

N° d'Ordre : D.U : 1877  
EDSPIC : 417

## **Université Blaise Pascal – Clermont-Ferrand II**

ECOLE DOCTORALE  
SCIENCES POUR L'INGENIEUR DE CLERMONT-FERRAND

### **Thèse**

Présentée Par

**Abdelaziz AMAMRA**

Pour obtenir le grade de  
**DOCTEUR D'UNIVERSITÉ**  
Spécialité : INFORMATIQUE

---

## **Techniques d'Estimation de la Bande Passante Disponible de Réseaux Sans Fil**

---

Soutenue Publiquement le 17 Novembre 2008 devant le jury :

Monsieur	Alain Quilliot	Président
Monsieur	Jacques Carlier	Rapporteur
Madame	Houda Labiod	Rapporteur
Monsieur	Mohamad Badra	Invité
Monsieur	Jean-Pierre Chanet	Invité
Monsieur	Kun Mean Hou	Directeur de thèse

---

Laboratoire d'Informatique, de **M**odélisation et d'**O**ptimisation des **S**ystèmes  
Laboratoire LIMOS UBP/CNRS UMR 6158  
Campus des Cézeaux, BP10125 - 63173 AUBIERE CEDEX



*A ma mère*  
*A mon père*  
*A mon épouse*  
*A toute ma Famille*  
*A ma jolie fille Hidaya*



## Remerciement

Je tiens tout d'abord à remercier vivement Madame LABIOD Houda et Monsieur CARLIER Jacques d'avoir accepté d'être rapporteur de mes travaux et Monsieur Alain Quilliot de bien avoir voulu présider mon jury de thèse. Merci également à Messieurs BADRA Mohamed et CHANET Jean-Pierre pour leurs participations à ce jury.

Je remercie bien évidemment le professeur Kun-Mean Hou d'avoir encadré cette thèse. Ces années de travail en commun m'ont beaucoup appris scientifiquement et humainement. Je souhaite à tous les doctorants d'avoir un directeur de thèse aussi généreux et aussi enclin à partager son savoir, son travail et son temps. Notre collaboration va bien entendu se poursuivre pour mon plus grand plaisir.

Je veux bien évidemment remercier les membres de l'équipe SMIR du LIMOS avec qui j'ai travaillé durant ces années, pour leur aide, les discussions enrichissantes et pour les moments que nous avons partagés. Je suis donc très reconnaissant envers : Messaoud KARA, Gil De Sousa, Christophe de Vault, Jian-Jin Li, Aurélien Jacquot, Xunxing Diao et Hao Ding. Je remercie Jean-Pierre CHANET du Cemagref pour ses corrections de ce manuscrit et ces précieux conseils. Merci aussi à Messaoud KARA pour les discussions enrichissantes que nous avons eues dans les différentes problématiques scientifiques de ce thème de recherche.

Je profite également de ce moment privilégié pour remercier le personnel de l'ISIMA pour les bons moments partagés et plus particulièrement envers : Béatrice Bourdieu, Martine Closset, Rose Séguy, Françoise Toledo, Daniel Breugnot et Frédéric Meignan.

Un merci particulier à mon épouse Zhour qui m'a encouragé durant toute la phase de la rédaction avec ses prières et sa patience. Aussi je remercie toute la famille, mes sœurs et mes frères pour leur amour infini.

Merci en fin à mes parents Barkahem et Mohamed qui m'ont épaulés par leurs prières, leur présence et leur soutien indéfectible à mes côtés même dans les moments les plus difficiles.



## Résumé

Aujourd'hui, les communications mobiles et sans fil sont devenues omniprésentes avec une large utilisation des téléphones cellulaires, des ordinateurs portables, des agendas numériques personnels et des consoles de jeux. Cela a créé la nécessité d'avoir une connectivité à n'importe quel endroit et à tout moment.

L'IEEE 802.11 (Wi-Fi) est le standard de WLAN (Wireless Local Area Network). En conséquence, le marché des produits dotés de la technologie réseau Wi-Fi est en plein essor et a provoqué une véritable révolution dans le monde de l'informatique. Cependant, la communication utilisant le Wi-Fi ne présente pas, pour autant, que des avantages. La grande différence entre le débit théorique et le débit effectif dépend de nombreux paramètres. Il est, par exemple, difficile de faire du streaming vidéo haute définition en utilisant un réseau IEEE 802.11g, alors que son débit théorique le permet parfaitement. La technologie WLAN souffre d'autres contraintes, comme la nature vulnérable du médium sans fil (interférences électromagnétiques, multi-trajet,...), l'accès indéterministe au médium, la limitation de la bande passante etc.

Les applications utilisant les réseaux Ad Hoc deviennent de plus en plus complexes et offrent de nouveaux services qui exigent des performances réseau de plus en plus élevées. De ce fait, la Qualité de Service (QoS) dans les réseaux Ad Hoc est un sujet de recherche ouvert. La bande passante est un indicateur très important pour la garantie de la QoS.

Dans notre travail de thèse, nous avons étudié l'un des aspects de la QoS qui est la Bande Passante Disponible (BPD) dans les réseaux Ad Hoc basés sur la norme IEEE 802.11. Particulièrement, nous nous sommes intéressés aux différentes techniques d'estimation de la BPD et avons évalué les performances de ces techniques du point de vue temps de réponse et précision des estimations. Ces techniques peuvent être utilisées dans d'autres types de réseaux sans fil ou filaire.

Nos contributions sont, essentiellement, le développement de deux nouvelles techniques d'estimation de la bande passante SLOT (SLOps-Topp) et TOPP-NET (TOPP-Non invasive Estimation Technique). Ces deux techniques sont le résultat d'améliorations successives des techniques d'estimation qui existent dans la littérature (TOPP : *Trains of Packet Pairs*, SLoPS : *Self-Loading Periodic Streams* et NIMBE : *Non Invasive Manet Bandwidth Estimation*) en mettons l'accent sur la *précision* et le *délai de sondage* des techniques d'estimation. Notre troisième contribution est une nouvelle méthode de filtrage adaptatif des estimations nommée ZONE-FILTER (*Filtrage par Zone*). Cette méthode combine les filtres EWMA et la méthode statistique SPC (Statistical Process Control).

**Mots Clés :** IEEE 802.11, Réseau Ad Hoc, Qualité de Service (QoS), Bande Passante Disponible, Réseau sans fil, Estimation, Filtrage adaptatif, protocole CIVIC,

# Abstract

Nowadays, mobile and wireless communications have become pervasive with the widespread use of cell phones, laptops, PDA and game consoles. Consequently, this created a demand for the ubiquitous connectivity at anytime and in anywhere.

IEEE 802.11b (Wi-Fi) is the protocol standard of WLAN (Wireless Local Area Network). As the market of the network products equipped with Wi-Fi is booming, a true revolution in the computer world happening. However, the communication adopting Wi-Fi technology also brings some challenges. For example, the theoretical throughput of the Wi-Fi communication has an obvious difference with the real one, e.g. it is difficult to make high-definition video streaming using an IEEE 802.11g network, but it's acceptable in the theoretical throughput estimation. Moreover, some inherent constraints of the wireless communication, such as the vulnerability of wireless medium (electromagnetic interference, multi-path...), the indeterminism access to the medium and limitation of the bandwidth etc, are also presented in the Wi-Fi network.

Applications in ad hoc networks become more complex and are able to offer more new services, which thus require improving the network performances of WLAN. The Quality of Service (QoS) in ad hoc networks is still an open research topic, in which the network bandwidth is a significant indicator for the QoS guarantee.

In this thesis we focus on one research issue of QoS: the available bandwidth (BPD) estimation in Ad Hoc networks based on IEEE 802.11. We compare different BPD estimation techniques and analyze the performances of these techniques in terms of response time and accuracy estimation. These techniques can be used in other types of wireless or Ethernet networks

Our contributions are: having developed two new techniques for estimating the bandwidth SLOT (SLOps-Topp) and TOPP-NET (TOPP Non-invasive Estimation Technique), which are based upon the two existed estimation techniques in the literature (TOPP: Trains of Packet Pairs, SLoPS: Self-Loading Periodic Streams and NIMBE: Non Invasive Manet Bandwidth Estimation) by improving the estimation accuracy and decreasing the probing delay; Having proposed a new estimations adaptive filter method called ZONE-FILTER (filtering by zone), ). Which combine the EWMA filters and the statistical method SPC (Statistical Process control).

**Keywords:** IEEE 802.11, Ad Hoc network, Quality of Service (QoS), Available Bandwidth, wireless network, Estimation, adaptive filtering, CIVIC protocol.



# Table des matières

<b>Liste des Figures</b> .....	xiv
<b>Liste des Tableaux</b> .....	xviii
<b>Liste des Acronymes</b> .....	xx
<b>Introduction</b> .....	1
<b>Chapitre I -Les réseaux sans fil et l'estimation de la Bande Passante Disponible</b> .....	5
<b>I.1 Communication et Qualité de Service dans les réseaux sans fil</b> .....	6
I.1.1 Les technologies des réseaux sans fil.....	6
I.1.1.1 La norme IEEE 802.11.....	9
I.1.1.2 Les dérivés de la norme IEEE 802.11.....	10
I.1.1.3 La mise en œuvre des WLANs.....	10
I.1.1.4 Méthodes d'accès au médium sans fil.....	11
I.1.2 Caractéristiques et contraintes de communication dans les réseaux Ad Hoc.....	14
I.1.3 Notions et paramètres de la Qualité de Service.....	16
I.1.3.1 La QoS dans les réseaux sans fil Ad Hoc.....	17
I.1.3.2 Modèles de la QoS.....	18
I.1.3.3 Protocoles de routage avec QoS.....	19
I.1.3.4 La Couche MAC avec QoS.....	21
I.1.3.5 Les réseaux WLAN multi-suppôts.....	22
I.1.3.6 La Radio Cognitive.....	22
<b>I.2 Estimation de la Bande Passante Disponible (BPD)</b> .....	23
I.2.1 Notions et paramètres de la bande passante.....	23
I.2.1.1 Bande passante.....	23
I.2.1.2 Capacité.....	23
I.2.1.3 Bande passante disponible .....	24
I.2.1.4 One Way Delay (OWD) .....	25
I.2.1.5 Round Trip Time (RTT) .....	26
I.2.1.6 Trafic Concurrent et Trafic de Sondage.....	27
I.2.2 Techniques et outils d'estimation de la BPD.....	27
I.2.2.1 Techniques Passives.....	27
I.2.2.2 Techniques Actives.....	29

I.2.3 Contraintes liées à l'estimation de la BPD dans les réseaux Ad Hoc.....	31
I.2.3.1 Synchronisation des horloges.....	31
I.2.3.2 Gestion des files d'attente.....	32
I.2.3.3 Modèle du Trafic Concurrent.....	32
I.2.3.4 Variabilité de la BPD.....	33
I.2.3.5 Pertes des paquets.....	33
I.2.3.6 La couche MAC et la dispersion des paquets.....	34
I.2.4 Filtrage Adaptatif des estimations de la BPD.....	34
<b>I.3 Synthèse.....</b>	<b>35</b>
<b>Chapitre II -Estimation de bande passante disponible :</b>	
<b>Techniques basées sur la dispersion des paquets.....</b>	<b>37</b>
<b>II.1 Techniques d'estimations basées sur la dispersion des paquets.....</b>	<b>38</b>
II.1.1 Principe de Base .....	38
II.1.2 La technique "Packet Pair/Train Dispersion" (PPTD) .....	39
II.1.2.1 Le sondage par Paire de Paquets .....	39
II.1.2.2 Le sondage par Train de Paquets.....	41
II.1.3 La technique "Trains Of Packet Paires" (TOPP) .....	44
II.1.3.1 Algorithme de la technique TOPP .....	44
a) La phase de sondage.....	44
b) Phase d'analyse des données.....	46
II.1.4 La technique "Self-Loading Periodic Streams" (SLoPS) .....	47
II.1.4.1 Algorithme de la technique SLoPS.....	47
a) La phase de sondage.....	48
b) La phase d'analyse.....	49
<b>II.2 Estimation de la Bande Passante Disponible et la Capacité du lien.....</b>	<b>51</b>
II.2.1 Environnement de la Simulation.....	52
II.2.1.1 Topologies des réseaux.....	52
II.2.1.2 Taille des paquets de sondage.....	53
II.2.1.3 Modèles de Trafic Concurrent.....	54
II.2.1.4 Scénarios de la simulation.....	54
a) Scénarios avec des paquets de sondage à taille variable.....	56
b) Scénarios avec un Trafic Concurrent à débit variable.....	56
II.2.2 Effets de la taille des paquets sur les estimations.....	57
II.2.3 Effets du débit du Trafic Concurrent sur les estimations.....	59
II.2.4 Evaluation des estimations dans les réseaux Ethernet et sans fil.....	62
II.2.4.1 L'estimation dans le réseau Ethernet.....	63
II.2.4.2 L'estimation dans le réseau Sans fil.....	64
II.2.5 Critiques et Limites des techniques TOPP et SLoPS.....	65
II.2.5.1 Le calcul des OWDs.....	66
II.2.5.2 L'aspect intrusif.....	66

II.2.5.3 Indéterminisme.....	66
II.2.5.4 Convergence et Précision.....	67
II.2.5.5 La simulation et les réseaux réels.....	67
<b>II.3 Synthèse.....</b>	<b>67</b>
 <b>Chapitre III : Contributions : Vers des nouvelles techniques d'estimation de la BPD.....</b>	 <b>69</b>
<b>III.1 SLOT : Une nouvelle technique d'estimation de la BPD.....</b>	<b>70</b>
III.1.1 Introduction.....	70
III.1.2 Modélisation du problème.....	71
III.1.2.1 Précision et délai de sondage dans TOPP.....	71
III.1.2.2 Précision et délai de sondage dans SLoPS.....	73
III.1.3 Contribution : La technique SLOT (SLOps-Topp) .....	75
III.1.3.1 Principe.....	75
III.1.3.2 Modèles Mathématiques.....	77
III.1.3.3 Précision et délai de sondage dans SLOT.....	78
III.1.3.4 Algorithme de SLOT.....	79
III.1.4 Simulation.....	80
III.1.4.1 Topologies des réseaux.....	80
III.1.4.2 Résultats.....	82
a) Délai de sondage.....	83
b) Précision.....	85
III.1.5 Limites et critiques de la technique SLOT.....	86
 <b>III.2 TOPP-NET (Train Of Packet Pair Non-invasive Estimation Technique) .....</b>	 <b>86</b>
III.2.1 Introduction.....	86
III.2.2 La technique NIMBE (Non Invasive Manet Bandwidth Estimation).....	87
III.2.2.1 Principe.....	87
III.2.2.2 Mesure et Filtrage des RTT.....	87
III.2.2.3 L'estimation de la BPD avec NIMBE.....	88
III.2.3 Contribution : La technique TOPP-NET.....	90
III.2.3.1 Motivations.....	90
III.2.3.2 Algorithme de TOPP-NET.....	90
III.2.3.3 Précision et délai de sondage dans TOPP-NET.....	92
III.2.4 Implémentation de TOPP-NET.....	93
III.2.5 Evaluation de la précision et du délai de sondage dans TOPP-NET.....	94
III.2.5.1 Expérimentation.....	95
III.2.5.2 Résultats.....	97
a) Précision.....	97
b) Délai de sondage.....	98

III.2.6 Limites et critiques de la technique TOPP-NET.....	100
<b>III.3 Synthèse.....</b>	<b>100</b>
 <b>Chapitre IV : Filtrage des estimations et Mise en Œuvre de l'estimateur TOPP-NET.....</b>	 <b>103</b>
<b>IV.1 Filtrage adaptatif des estimations.....</b>	<b>104</b>
IV.1.1 Les Systèmes de Filtrages Adaptatifs.....	105
IV.1.1.2 Les Filtres EWMA.....	105
IV.1.1.3 Le Filtre de Stabilité.....	105
IV.1.1.4 Le Filtre d'Erreur.....	107
IV.1.1.5 Le Filtre Flip-Flop.....	108
a) Le Contrôle Statistique des Processus (CSP) .....	108
b) La règle 3-sigma.....	109
c) Algorithme du filter Flip-Flop .....	110
IV.1.2 Contribution : Filtrage par Zone.....	111
IV.1.3.1 Les règles de WECO.....	112
IV.1.3.2 Le filtre adaptatif Zone-Filter.....	113
IV.1.3 Evaluation des filtres Flip-Flop et Zone-Filter.....	116
IV.1. 3.1 Scenarios et expérimentations.....	116
IV.1. 3.2 Résultats et discussions.....	117
<b>IV.2 Mise en œuvre de l'estimateur de la BPD TOPP-NET.....</b>	<b>119</b>
IV.2.1 Processus indépendant.....	120
IV.2.2 Protocole d'émission adaptatif.....	120
IV.2.3 Différentiation des Services.....	122
IV.2.3.1 Modèles de QdS.....	122
IV.2.3.2 Applications Multimédia/Temps réel.....	123
IV.2.3.3 Protocoles de routage avec QdS.....	123
IV.2.4 Le protocole CIVIC (Communication Inter Véhicules Intelligente et Coopérative).....	124
IV.2.4.1 Objectifs du protocole CIVIC.....	124
IV.2.4.2 Architecture du protocole CIVIC.....	125
IV.2.4.3 Caractéristiques du protocole CIVIC.....	126
IV.2.4.4 Différenciation de service dans le protocole CIVIC.....	127
<b>IV.3 Synthèse.....</b>	<b>128</b>
<b>Conclusions et Perspectives.....</b>	<b>129</b>
<b>Bibliographies.....</b>	<b>133</b>

## Liste des Figures

I.1 : Les classes des réseaux sans fil débit/portée.....	7
I.2 : Les couches physiques dans la norme IEEE 802.11.....	9
I.3 : Modes de fonctionnement des réseaux WLAN.....	11
I.4 : La méthode d'accès DCF.....	12
I.5 : La méthode d'accès RTS/CTS.....	13
I.6 : Problème de la station cachée.....	13
I.7 : Exemple d'un réseau Ad Hoc civil.....	16
I.8 : Les bandes passantes théoriques et réelles des différents standards de WLAN d'après [Pujolle 03].....	24
I.9 : Utilisation instantanée du médium pendant une période $[0, T]$ .....	24
I.10 : Le trafic de données dans un chemin à 3 sauts.....	25
I.11 : Définition de OWD et RTT.....	26
I.12 : MRTG trace d'une journée avec une période de 5 minutes.....	33
II.1 : Principe de la dispersion de paquets.....	40
II.2 : Le concept d'Auto-Congestion.....	42
II.3 : La phase de sondage dans la technique TOPP.....	45
II.4 : Exemple de l'estimation de la BPD avec la technique TOPP, pour un réseau Ethernet de 10 Mb/s.....	47
II.5 : La phase de sondage de la technique SLoPS, $I$ est le nombre total d'itération.....	48
II.6 : L'évolution des OWDs des paquets du train [Jain 02b] .....	51
II.7 : Topologie du réseau Ethernet.....	52
II.8 : Topologie du réseau Sans fil.....	53
II.9 : Format du paquet échangé entre la source et la destination.....	54
II.10 : Ethernet, en variant la taille des paquets, les estimations de la BPD et la Capacité du lien sont quasi stables.....	57
II.11 : IEEE 802.11, la BPD et la Capacité du lien sont affectées par la variation de la taille des paquets.....	57
II.12 : Ethernet, L'évolution de la BPD en fonction de la taille des paquets. Le débit du <i>Traffic</i> <i>Concurrent</i> est 2Mb/s.....	58
II.13 : IEEE 802.11, L'évolution de la BPD en fonction de la taille des paquets. Le débit du <i>Traffic Concurrent</i> est 2Mb/s.....	59

II.14 : Ethernet, seulement la BPD est affectée par la variation de débit du <i>Trafic concurrent</i> , les valeurs de la Capacité du lien restent stables.....	60
II.15 : IEEE 802.11, les valeurs de la BPD et la Capacité sont affectées par la variation de débit du <i>Trafic concurrent</i> .....	60
II.16 : La BPD en fonction de débit <i>Trafic Concurrent</i> .....	61
II.17 : Format du paquet Ethernet du protocole IEEE 802.3.....	62
II.18 : Format du paquet sans fil dans le protocole IEEE 802.11.....	62
II.19 : Les opérations effectuées au niveau de la couche MAC pour chaque paquet envoyé.....	63
III.1 : Le modèle de sondage dans la technique SLOT.....	76
III.2 : La topologie du réseau sans fil.....	80
III.3 : L'évolution des délais de sondage en fonction des valeurs estimées de BPD.....	84
III.4 : L'évolution de la précision en fonction des valeurs estimées de la BPD.....	85
III.5 : Un exemple de mesure de RTT [Chanet 06].....	88
III.6 : Les résultats de la technique NIMBE [Chanet 06].....	89
III.7 : Le modèle de sondage dans la technique TOPP-NET.....	91
III.8 : Les processus INIT et MSDR du programme TOPP-NET.....	94
III.9 : La topologie de l'expérimentation.....	95
III.10 : L'évolution de la précision de SLOT et TOPP-NET.....	98
III.11 : L'évolution du délai de sondage de SLOT et TOPP-NET BPD.....	99
IV.1 : Exemple de Filtre de Stabilité [Kim 2001].....	106
IV.2 : Exemple du Filtre d'Erreur [Kim 2001].....	107
IV.3 : Carte de contrôle de CSP.....	108
IV.4 : Carte de contrôle de CSP avec les limites de 3-Sigma.....	109
IV.5 : La sélection entre le filtre agile et stable dans le filtre Flip-Flop.....	111
IV.6 : L'application du filtre Flip-Flop sur un processus d'estimation de la BPD.....	111
IV.7 : Les règles de WECO et les probabilités correspondantes.....	113
IV.8 : La division du graphe de contrôle en Zones.....	113
IV.9 : Le fonctionnement du Zone-Filter en sélectionnant le filtre selon la Zone.....	115
IV.10 : L'application du filtre Zone-Filter sur un processus d'estimation de la BPD.....	115
IV.11 : Topologie Ad-Hoc pour tester les filtre Flip-Flop et Zone-Filter.....	116
IV.12 : Filtrage des estimations en utilisant le filtre Flip-Flop.....	117
IV.13 : Filtrage des estimations en utilisant le Filtre Zone-Filter.....	117
IV.14 : Le CV pour le filtre Flip-Flop.....	118
IV.15 : Le CV pour le filtre Zone-Filter.....	119

IV.16 : TOPP-NET en tant que processus Daemon.....	120
IV.17 : Protocole d'émission adaptatif utilisant l'estimateur TOPP-NET.....	121
IV.18 : L'automate de gestion d'émission Adaptatif.....	121
IV.19 : Exemple de Différentiation de Services dans un modèle de la QdS avec TOPP-NET...	123
IV.20 : Les couches du protocole CIVIC.....	125
IV.21 : L'estimateur TOPP-NET et la différenciation de services dans CIVIC.....	127





## Liste des Tableaux

I.1 : Caractéristiques techniques des technologies sans fil [Khoukhi 04].....	8
I.2 : Evolution de la norme IEEE 802.11.....	10
I.3 : les techniques d'estimation de la BPD et la capacité [Prasad 03].....	31
II.1 : Paramètres de la technique TOPP.....	55
II.2 : Paramètres de la technique SLoPS.....	55
II.3 : Paramètres de la simulation.....	56
II.4 : paramètre du protocole IEEE 802.11b avec une couche physique DSSS.....	63
II.5 : Les valeurs maximales de la BPD et les précisions des estimations de SLoPS.....	65
III.1 : Les paramètres de TOPP.....	81
III.2 : Les paramètres de SLoPS.....	81
III.3 : Les paramètres de SLOT.....	82
III.4 : Les paramètres de la simulation.....	82
III.5 : Résultats de la simulation : Les délais de sondage de SLoPS, TOPP et SLOT.....	83
III.6 : Résultats de la simulation : Les précisions de SLoPS, TOPP et SLOT.....	85
III.7 : Les paramètres de la technique TOPP-NET.....	96
III.8 : Les paramètres de l'expérimentation.....	96
III.9 : Résultats de l'expérimentation : Les précisions de SLOT et TOPP-NET.....	97
III.10 : Résultats de l'expérimentation : Les délais de sondage SLOT et TOPP-NET.....	98
IV.1 : Quatre filtres EWMA qui composent le Zone-Filter.....	115



## Liste des Acronymes

<b>AAC</b>	Adaptive Admission Control	<b>CW</b>	Contention Window
<b>Ack</b>	Acknowledgement	<b>DCF</b>	Distributed Coordination Function
<b>AES</b>	Advanced Encryption Standard	<b>DiffServ</b>	Differentiated Services
<b>AF</b>	Assured Forwarding	<b>DIFS</b>	DCF Inter-Frame Spacing
<b>AODV</b>	Ad hoc On-demand Distance Vector routing	<b>DSR</b>	Dynamic Routing Source
<b>ARF</b>	Auto Rate Fallback	<b>DSSS</b>	Direct Sequence Spread Spectrum
<b>BE</b>	Best Effort	<b>e-CIVIC</b>	embedded-CIVIC
<b>BPD</b>	Bande Passante Disponible	<b>EDCF</b>	Enhanced Distributed Coordination Function
<b>BRuIT</b>	Bandwidth Reservation Under In Terferences influence	<b>EF</b>	Expedited Forwarding
<b>BSS</b>	Basic Service Set	<b>EIFS</b>	Extended Interframe Space
<b>BWER</b>	BandWidth Efficiency Ratio	<b>EWMA</b>	Exponentially Weighted Moving Average
<b>CACP</b>	Contention-Aware Admission Control. Protocol	<b>FEC</b>	Forward Error Correction
<b>CBR</b>	Constant Bit Traffic	<b>FHSS</b>	Frequency Hopping Spread Spectrum'
<b>CEDAR</b>	Core Extraction Distributed Ad hoc Routing	<b>FIFO</b>	First In First Out
<b>CIVIC</b>	Communication Inter Véhicules Intelligente et Coopérative	<b>FQMM</b>	Flexible Quality of Service Model for Mobile Ad Hoc Networks
<b>CL</b>	Controlled Load service	<b>FTP</b>	File Transfer Protocol
<b>CP</b>	Contention Period	<b>GPRS</b>	General Packet Radio Service
<b>CRC</b>	Contrôle de Redondance Cyclique	<b>GPS</b>	Global Positioning System
<b>CSMA/CA</b>	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance	<b>GSM</b>	Global System for Mobile communication
<b>CSMA/CD</b>	Carry Sense Medium Access/Collision Detection	<b>HFC</b>	Hybrid Function Coordination
<b>CSP</b>	Contrôle Statistique des Processus	<b>HIPERLAN</b>	High Performance Radio Local Area Network
<b>CTS</b>	Clear To Send	<b>http</b>	HyperText Transfer Protocol
<b>CV</b>	Coefficient de Variation	<b>IAPP</b>	Inter-Access Point Protocol
		<b>IBSS</b>	Indépendant Basic Service Set

<b>IBSS_ID</b>	IBSSS IDentifier		Multiplexing
<b>ICMP</b>	Internet Control Message Protocol	<b>OLSR</b>	Optimized Link State Routing protocol
<b>IEEE</b>	Institute of Electrical and Electronics Engineers	<b>OWD</b>	One-way Delay
<b>IETF</b>	Internet Engineering Task Force	<b>PA</b>	Point d'Accès
<b>IntServ</b>	Integrated Services	<b>PAN</b>	Personal Area Network
<b>IP</b>	Internet Protocol	<b>PC</b>	Personal Computer
<b>IPMON</b>	IP Monitor	<b>PCF</b>	Polling Coordination Function
<b>IR</b>	InfraRed light	<b>PCT</b>	Pairwise Comparison Test
<b>IRTF</b>	Internet Research Task Force	<b>PDA</b>	Personal Digital Assistant
<b>LAN</b>	Local Area Network	<b>PDT</b>	Pairwise Different Test
<b>LCL</b>	Lower Control Limit	<b>PGM</b>	Probe Gap Model
<b>LIMOS</b>	Laboratoire d'Informatique, de Modélisation et d'Optimisation des Systèmes	<b>PHY</b>	Couche PHYsique
<b>LLC</b>	Logical Link Control	<b>PLCP</b>	Physical Layer Convergence Procedure
<b>MAC</b>	Media Access Control	<b>PPTD</b>	Packet Pair/Train Dispersion
<b>MANET</b>	Mobile Ad hoc NETwork	<b>QoS</b>	Qualité de Service
<b>MATLAB</b>	Matrix Laboratory	<b>QOLSR</b>	QoS in ad hoc networks using OLSR
<b>MIMO</b>	Multiple-Input Multiple-Output	<b>RFC</b>	Requests For Comment
<b>MMRS</b>	Multiservice Router and Server	<b>RTS</b>	Ready To Send
<b>MMWN</b>	Multimédia support for Mobile Wireless Networks	<b>RTT</b>	Round-Trip Time
<b>MRTG</b>	Multi Router Traffic Grapher	<b>SFD</b>	Start Frame Delimiter
<b>MTU</b>	Maximum Transfer Unit	<b>SIFS</b>	Short InterFrame Space
<b>NAV</b>	Network Allocation Vector	<b>SLoPS</b>	Self-Loading Periodic Streams
<b>NIMBE</b>	Non Invasive MANET Bandwidth Estimator	<b>SLOT</b>	SLOps-Topp
<b>NS-2</b>	Network Simulator version 2	<b>SMIR</b>	Système Multi-sensoriel Intelligent intégré Réparti
<b>NTP</b>	Network Time Protocol	<b>SMTP</b>	Simple Mail Transfer Protocol
<b>OFDM</b>	Orthogonal Frequency Division	<b>SSID</b>	Service Set IDentifier
		<b>SWAN</b>	Seamless Wireless ATM Network
		<b>TBRPF</b>	Topology Broadcast based on Reverse-Path Forwarding

<b>TCP/IP</b>	Transmission Control Protocol/Internet Protocol
<b>TDMA</b>	Time Division Multiple Access
<b>TOPP</b>	Trains of Packet Pairs
<b>TOPP-NET</b>	Train Of Packet Pair Non- Introduction
<b>TTL</b>	Time To Live
<b>UCL</b>	Upper Control Limit
<b>UDP</b>	User Datagram Protocol
<b>UMTS</b>	Universal Mobile Telecommunications System
<b>UWB</b>	Ultra Wight Band ,
<b>VPS</b>	Variable Packet Size
<b>WECO</b>	Westerne Electric Company rules
<b>Wi-Fi</b>	Wireless Fidelity
<b>WiMAX</b>	Worldwide interoperability for Microwave Access
<b>WLAN</b>	Wireless Local Area Network
<b>WMAN</b>	Wireless Metropolitan Area Network
<b>WPAN</b>	Wireless Personal Area Network
<b>WSN</b>	Wireless Sensor Networks
<b>WWAN</b>	Wireless Wide Area Network
<b>ZRP</b>	Zone Routing Protocol



## **Introduction**

Aujourd'hui, les communications mobiles et sans fil sont devenues omniprésentes avec une large utilisation des téléphones cellulaires, des ordinateurs portables, des agendas numériques personnels et les consoles de jeux. Cela a créé la nécessité d'une connectivité à n'importe quel endroit et à tout moment. Les principales raisons de cette forte croissance sont la facilité d'implémentation des réseaux sans fil et la baisse des coûts de cette technologie. Le marché de la téléphonie mobile a connu un essor spectaculaire au cours de ces dernières années. Les téléphones mobiles sont nécessaires non seulement pour la communication vocale, mais aussi pour l'envoi et la réception du texte, des photos et de la vidéo. La demande d'accès à Internet sans fil est aussi en pleine croissance, avec l'arrivée de la technologie WLAN (Wireless Area Network). Tous les fournisseurs d'accès proposent des routeurs équipés avec cette technologie pour accéder à Internet depuis n'importe quel endroit dans la maison sans être connecté au câble Internet. La demande d'accès à Internet sans fil a entraîné la création des points d'accès 'Hot-Spots' dans des endroits publics, comme les campus universitaires, les cafés et les aéroports. Plusieurs grandes villes envisagent de mettre en place le service d'accès à Internet sans fil gratuitement au public.

Plusieurs normes ont été proposées et développées dans les réseaux sans fil de type WLAN : Hiperlan2, HomeFR, ZigBee et Wi-Fi (Wireless Fidelity) etc. Cependant le Wi-Fi (IEEE 802.11) est la norme préférée et la plus utilisée pour les WLAN. En effet, l'IEEE 802.11 est le standard de WLAN. En conséquence, le marché des produits dotés de la technologie réseau Wi-Fi est en plein essor et a provoqué une véritable révolution dans le monde de l'informatique. La communication utilisant le Wi-Fi ne présente pas, pour autant, que des avantages. La grande différence entre le débit théorique et le débit effectif dépend de nombreux paramètres. Il est, par exemple, difficile de faire du streaming vidéo haute définition en utilisant un réseau IEEE 802.11g, alors que son débit théorique le permet parfaitement. La technologie WLAN souffre d'autres contraintes, comme la nature vulnérable du médium sans fil (interférences électromagnétiques, multi-trajet,...), l'accès indéterministe au médium, la limitation de la bande passante etc.

Les réseaux WLAN peuvent être exploités en mode Infrastructure (points d'accès Internet) ou en mode Ad Hoc (communication inter-véhicule, réseau de capteurs sans fil, ...). Un réseau Ad Hoc est composé de dispositifs (nœuds) sans fil autonomes, fixes ou mobiles qui ne nécessitent aucune administration par une infrastructure centrale. Ces nœuds sont

capables de coopérer et s'organiser dynamiquement. Un réseau Ad Hoc hérite de toutes les contraintes liées au WLAN. En outre, l'absence d'une infrastructure d'administration et l'aspect dynamique de ces réseaux pose d'autres problèmes comme le routage entre les nœuds pour acheminer un message d'un nœud à un autre dans le réseau.

Les applications utilisant les réseaux Ad Hoc deviennent de plus en plus complexes et offrent de nouveaux services qui exigent des performances réseau de plus en plus élevées. Ces performances se traduisent en termes de délai d'acheminement des messages entre deux nœuds sans fil (délai de bout-en-bout) ou en termes de débit de transmission des messages (bande passante). Garantir un niveau satisfaisant de ces performances aux applications c'est garantir la Qualité de Service (QoS) à ces applications. Cependant, certains services (transmission vidéo/audio, messages d'urgence) offerts pour des applications multimédia et temps réel exigent un niveau de QoS très élevé. Face aux nombreuses applications diverses et multiples de réseaux Ad Hoc sans fil, leur garantie de la QoS reste une tâche difficile pour les opérateurs. De ce fait, la QoS dans le réseau Ad Hoc est un sujet de recherche ouvert. Avant de garantir la QoS nous devons avoir une image précise des performances réseau. Pour cela les chercheurs mettent en place des techniques de mesure des performances des réseaux Ad Hoc (délai de bout-en-bout, bande passante disponible,...). Mesurer ces performances permet de garantir la QoS en gérant les messages émis dans le réseau par ces applications. Ces dernières émettent des données de différentes natures : vidéo/audio (tolérant la perte de paquets et en exigeant une bande passante considérable) ; transfert de fichiers (tolérant des délais prolongés, mais ne tolère aucune perte et erreur des paquets) ...

La bande passante est un indicateur très important pour la garantie de la QoS. Dans nos travaux, nous avons étudié les techniques de mesure de la bande passante disponible dans un réseau sans fil Ad Hoc. En effet, la connaissance la bande passante disponible, permet de gérer finement le trafic d'un réseau par rapport aux contraintes des différentes applications. Ainsi, une différenciation de service peut être mise en place pour offrir une QoS aux différents types de flux de données générés par les applications. Cette différenciation permet aux nœuds d'avoir un comportement citoyen en gérant leurs émissions/réceptions d'une façon adaptative. Par conséquent, une surcharge du réseau et/ou une dégradation de ses performances peuvent être évitées.

Nos contributions sont représentées par le développement de deux nouvelles techniques d'estimation de la bande passante SLOT et TOPP-NET. Ces techniques sont les résultats des améliorations successives des techniques d'estimations qui existent dans littérature (TOPP : *Trains of Packet Pairs*, SLoPS : *Self-Loading Periodic Streams* et NIMBE : *Non Invasive Manet Bandwidth Estimation*) en mettons l'accent sur la *précision* et le *délai de sondage* des techniques d'estimation. Une troisième contribution représentée dans une nouvelle méthode de filtrage adaptatif nommée ZONE-FILTER (*Filtrage par Zone*).

Ce manuscrit est composé de quatre chapitres organisés comme suit :

Le premier chapitre est consacré à l'état de l'art des technologies sans fil et leurs



caractéristiques. Les différents paramètres de la QdS sont présentés ainsi que leur intégration dans les réseaux Ad Hoc. Parmi ces paramètres nous focalisons notre travail sur la bande passante disponible. Ainsi, nous présentons un état de l'art des techniques d'estimation de la bande passante disponible avec leurs avantages et inconvénients.

Dans le deuxième chapitre nous axons notre travail sur le fonctionnement des techniques d'estimations actives basées sur la dispersion des paquets (TOPP, SLoPS). Nous étudions le comportement de ces techniques dans le domaine sans fil et filaire.

Le troisième chapitre présente nos deux contributions dans le domaine d'estimation de la bande passante disponible. Notre première contribution est une combinaison des deux techniques TOPP et SLoPS, réalisée en utilisant une modélisation mathématique des performances de ces techniques (précision et délai de sondage). Le résultat de cette combinaison est une nouvelle technique nommée SLOT (SLOps-Topp). La deuxième contribution est la technique TOPP-NET (TOPP : *Non-invasive Estimation Technique*). Cette technique est une amélioration de SLOT en utilisant une autre technique nommée NIMBE.

Le quatrième chapitre s'intéresse au filtrage adaptatif des estimations et la mise en œuvre des estimateurs de la bande passante disponible. Dans la première partie nous présentons notre troisième contribution qui est un nouveau filtre nommé *Zone-Filter* (ou filtrage par zone). *Zone-Filter* est un filtre adaptatif qui s'accorde avec la nature des estimations de la Bande passante disponible. Les différentes mises en œuvre de l'estimateur de bande passante disponible TOPP-NET sont présentées dans la deuxième partie du quatrième chapitre. Nous prenons l'exemple du protocole CIVIC (Communication Inter Véhicule Intelligente et Coopérative).

La conclusion de ce manuscrit donne un récapitulatif de notre travail, apporte une critique du travail accompli et suggère des travaux futurs.

\*\*\*\*\*



# **Chapitre I**

## **Les réseaux sans fil et l'estimation de la Bande Passante Disponible**

### **Sommaire**

---

#### **I.1 Communication et Qualité de Service dans les réseaux sans fil**

- I.1.1 Les technologies des réseaux sans fil
- I.1.2 Caractéristiques et contraintes de communication dans les réseaux Ad Hoc
- I.1.3 Notions et paramètres de la Qualité de Service

#### **I.2 Estimation de la Bande Passante Disponible (BPD)**

- I.2.1 Notions et paramètres de la bande passante
- I.2.2 Techniques et outils d'estimation de la BPD
- I.2.3 Contraintes liées à l'estimation de la BPD dans les réseaux Ad Hoc
- I.2.4 Filtrage Adaptatif des estimations de la BPD

#### **I.3 Synthèse**

---

La prolifération des technologies mobiles (ordinateurs portables, les assistants numériques personnels [PDA]...) ces dernières années, a conduit à un changement révolutionnaire du monde informatique. Nous passons de l'utilisation individuelle de l'ordinateur (PC) à l'utilisation collective des plateformes communes de calcul. Plusieurs utilisateurs peuvent accéder simultanément à ces plateformes via Internet, et ce à tout instant et à partir de n'importe quel endroit. Cette souplesse d'accès aux données a mené à la croissance rapide de l'utilisation des réseaux locaux sans fil, ce qui impose de grands défis aux réseaux Ad Hoc sans fil pour supporter des applications multimédias.

Ce chapitre est divisé en deux parties. Dans la première nous présentons les caractéristiques des réseaux sans fil et le processus d'intégration du support de la QoS (Qualité de Service) dans les réseaux Ad Hoc. La bande passante est considérée comme le paramètre le plus important garantissant la QoS dans un réseau Ad Hoc. L'état de l'art des techniques d'estimation de la bande passante disponible dans l'environnement sans fil, ainsi que notre contribution, seront présentés dans la deuxième partie.

## **I.1 Communication et Qualité de Service dans les réseaux sans fil**

Les systèmes de communications sans fil émergent d'une façon très rapide et emploient des technologies diverses, telles que la téléphonie cellulaire (GSM, GPRS, UMT etc.), les réseaux personnels de communications (PAN) et les réseaux locaux sans fil (WLAN). Ces derniers fonctionnent en mode *Infrastructure* ou en mode Ad Hoc. Les réseaux Ad Hoc constituent une composante clé des futurs réseaux sans fil. La plupart des travaux de recherches dans les réseaux Ad Hoc utilisent la norme IEEE 802.11. Cette technologie est peu coûteuse et largement disponible. La QoS dans les réseaux Ad Hoc basés sur la norme IEEE 802.11 est le problème de recherche le plus abordé après celui du routage. Ces recherches ont été motivées par la diversité des applications supportées par ce type de réseau. De plus, les applications sans fil demandent des services de plus en plus diversifiés. Dans ce qui suit nous explorons les technologies qui se cachent derrière ces réseaux, les différents modèles de la qualité de service et leur intégration aux niveaux des couches réseau.

### **I.1.1 Les technologies des réseaux sans fil**

Les réseaux sans fil visent à remplacer les réseaux filaires en offrant des services semblables avec l'avantage supplémentaire de la mobilité. Comme le montre la Figure I.1, les réseaux sans fil sont classés selon leurs portées et de leurs débits en quatre grandes classes :

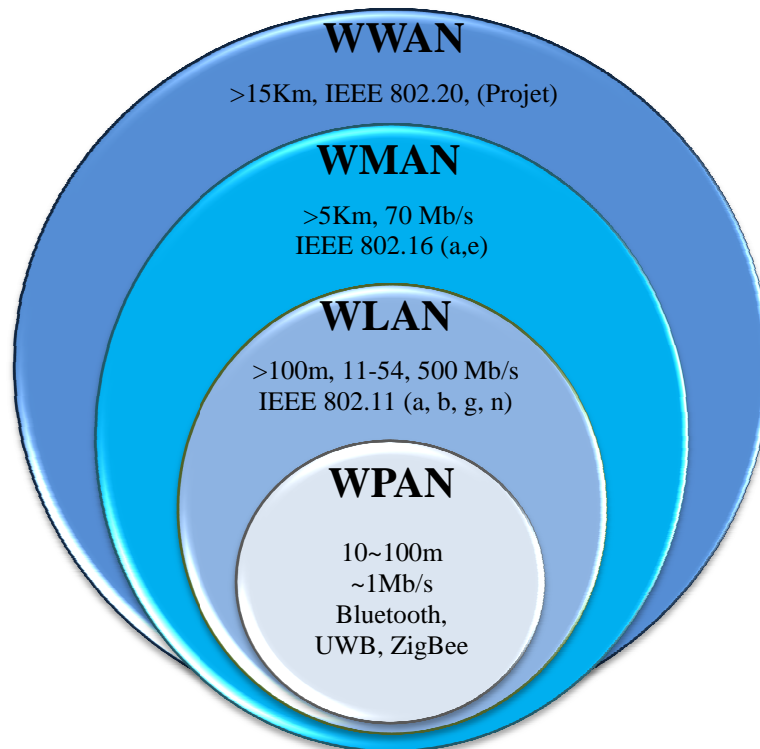


Figure I.1 : Les classes des réseaux sans fil débit/portée

**a) WPAN (Wireless Personnel Area Network):**

Les WPAN sont conçus spécialement pour répondre aux besoins de communications à faibles portées (de quelques mètres à quelques dizaines de mètres), à faible débit d'échange (de 100Kb/s à 1Mb/s) et à basse consommation d'énergie (moins de 1 mA en mode veille). Les standards IEEE 802.15.1 (Bluetooth), IEEE 802.15.4 (ZigBee), IEEE 802.15.3 (UWB) (Ultra Wight Band), sont les technologies les plus connues et qui semblent être de bons candidats pour les réseaux WPAN. Mis à part l'UWB qui opère dans la bande 7,5 GHz, le reste des WPAN opèrent dans la bande de 2.4 GHz. Les périphériques correspondant à ce type de communication et qui utilisent les WPAN sont (PDA avec un PC, un téléphone portable avec son oreillette, imprimante...). La faible consommation d'énergie permet plus d'autonomie à l'équipement sans fil, cette caractéristique permet l'utilisation des WPAN pour des réseaux de capteurs sans fil WSN (Wireless Sensor Network) [Hill 2002].

**b) WLAN (Wireless Local Area Network):**

Avec une portée de communication de 100 à 500 mètres (la même que dans le LAN filaire), la norme IEEE 802.11 est la plus connue dans ce type de réseau. Des dérivées de cette norme ont été créées afin de répondre à des objectifs d'interopérabilité ou de sécurité ; les plus connues aujourd'hui sont les normes IEEE 802.11b et IEEE 802.11g qui opèrent dans la bande

2,4 GHz. Tandis que, la norme IEEE 802.11a utilise la bande 5 GHz. Apparue fin 2007 la nouvelle Norme IEEE 802.11n opère dans les deux bandes 2,4 et 5 GHz. La technologie IEEE 802.11 est très connue sous le label Wi-Fi (Wireless Fidelity). Nous détaillerons ses caractéristiques dans les sections suivantes.

**c) WMAN (Wireless Metropolitan Area Network) :**

Les WMAN sont des réseaux de grandes dimensions, ayant une portée de plusieurs kilomètres et utilisant les bandes de 2 à 6 GHz et 11 GHz. Les WMAN regroupent les standards WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access), IEEE 802.16d, IEEE 802.16e et IEEE 802.20. Comme les technologies sans fil cellulaire, les technologies WMAN nécessitent une infrastructure importante.

**d) WWAN (Wide Wireless Area Network) :**

Cette classe de réseaux concerne les technologies de la téléphonie mobile cellulaire, qui regroupent les standards : le GSM (Global System for Mobile communication), le GPRS (General Packet Radio Service) ou l'UMTS (Universal Mobile Telecommunications System). Les WWAN opèrent dans la bande de 400 à 2,100 MHz, ils ont des portées beaucoup plus larges que les WLAN, et une couverture qui s'étend à l'échelle de tout un pays. Les WWAN permettent l'accès sans fil aux données Internet à travers les points d'accès de l'infrastructure cellulaire.

Le Tableau I.1 résume les caractéristiques techniques des différents types de réseau sans fil.

Nom commercial	Type	Standard	Débit Maximum	Portée	Band de fréquence
UWB	WPAN	IEEE 802.15.3a	110-480 Mb/s	10 m	3,1, 10 ,6 GHz
Bluetooth		IEEE 802.15.1	1 MB /s	100 m	2.4 GHz
ZigBee		IEEE 802.15.4	250 Kb/s		
Wi-Fi	WLAN	IEEE 802.11a	54 Mb/s	100 m	5 GHz
Wi-Fi		IEEE 802.11b/g	11 Mb/s - 54Mb/s		2.4 GHz
WiMAX	WMAN Fixe	IEEE 802.16d	74 Mb/s	Typique 4-10 km	Moins de 11 GHz
WiMAX	WMAN Portable	IEEE 802.16e	30 Mb/s	Typique 1-5 km	2-6 GHz
EDGE/GPRS (TDMA-GSM)	WWAN	2.5G	384 Kb/s	Typique 1-15 km	1.900 MHz
CDMA2000/1xE V-DO		3G	2.4 Mb/s		400, 800, 900, 1.700, 1800, 1.900, 2.100 MHz
WCDMA/UMTS			2 Mb/s		1800, 1.900, 2.100 MHz

Tableau I.1 : Caractéristiques techniques des technologies sans fil [Khoukhi 2006].

### I.1.1.1 La norme IEEE 802.11

Le premier standard de WLAN est l'IEEE 802.11, proposé par l'IEEE en 1997, connue aussi sous la dénomination Wi-Fi (Wireless Fidelity), qui correspond en réalité à un label délivré par le consortium d'industriels intitulé la "Wi-Fi Alliance". Ce label garantit l'interopérabilité des équipements issus de différents fabricants, mais par abus de langage, le terme Wi-Fi est également employé pour désigner les normes IEEE 802.11.

Le standard IEEE 802.11 ne concerne qu'une partie de la couche liaison de données (la sous couche MAC) et la couche physique (PHY) du model TCP/IP (Figure I.2). Donc Il est totalement transparent par rapport aux applications et aux protocoles des couches supérieures (TCP/IP, UDP/IP, http, FTP,...).

La couche MAC utilise la méthode CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) pour gérer l'accès au canal entre les différentes stations dans le réseau local sans fil. La couche Physique utilise différents types d'implémentations comme FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum), DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) et OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing). La Figure I.2 montre la couche MAC les différentes couches physiques utilisées par la norme IEEE 802.11.

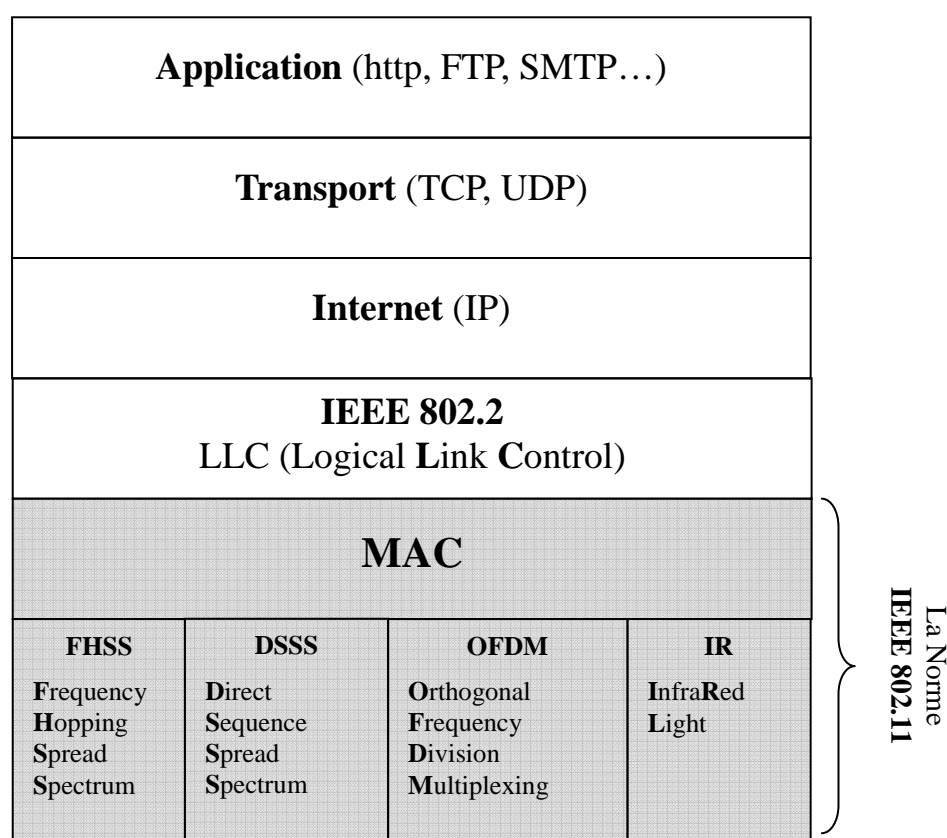


Figure I.2 : Les couches physiques dans la norme IEEE 802.11

### I.1.1.2 Les dérivés de la norme IEEE 802.11

La première version du standard l'IEEE 802.11 qui date de 1997 fonctionne avec des débits allant jusqu'à 2 Mb/s. Dès lors, plusieurs dérivés ont vu le jour, comme l'IEEE 802.11b connue aussi sous le nom Wi-Fi (Wireless Fidelity) ; commercialisé en 1999, il fonctionne dans la bande de 2.4 GHz avec un débit théorique allant jusqu'à 11 Mb/s. Les autres versions comme 802.11a, 802.11e, 802.11g, etc. sont détaillées dans le Tableau I.2.

La norme	Descriptions
<b>IEEE 802.11</b>	Est la première version de réseau local sans fil, sur liaison radio ou infrarouge.
<b>IEEE 802.11b</b>	Opère avec un débit jusqu'à 11Mb/s sur une bande de 2.4 GHz label de qualité Wi-Fi
<b>IEEE 802.11a</b>	Opère avec un débit jusqu'à 54 Mbit/s sur une bande de 5 GHz
<b>IEEE 802.11c</b>	Etablit un pont avec les trames 802.11 (niveau liaison de données). Il s'agit uniquement d'une modification de la norme 802.11d
<b>IEEE 802.11d</b>	Permet aux différents équipements 802.11 d'échanger des informations sur les plages de fréquence et les puissances autorisées dans le pays d'origine du matériel.
<b>IEEE 802.11e</b>	Intègre de la QoS dans la couche MAC 802.11, en termes de bande passante et délais.
<b>IEEE 802.11f</b>	Propose la gestion des changements de point d'accès (Handover), Protocole IAPP (Inter-Access Point Protocol) entre bornes d'accès 802.11
<b>IEEE 802.11g</b>	Opère avec débit jusqu'à 54 Mbit/s sur une bande de 2,4 GHz
<b>IEEE 802.11h</b>	Rapproche la norme 802.11 au standard Européen (HiperLAN 2, d'où le h de 802.11h) et être en conformité avec la réglementation européenne en matière de fréquence et d'économie d'énergie.
<b>IEEE 802.11i</b>	Améliore de la sécurité des transmissions (gestion et distribution des clés, chiffrement et authentification). Cette norme s'appuie sur l'AES / 802.11 (Advanced Encryption Standard)
<b>IEEE 802.11j</b>	Adapte la norme 802.11j à la réglementation japonaise comme le 802.11h à la réglementation européenne
<b>IEEE 802.11n</b>	Utilise simultanément les fréquences 2,4 et 5 GHz Avec un débit théorique atteint les 600 Mbit/s (débit réel de 100 Mbit/s dans un rayon de 90 mètres) grâce aux technologies MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) et OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing).

Tableau I.2 : Evolution de la norme IEEE 802.11

### I.1.1.3 La mise en œuvre des WLANs

La couche MAC publiée dans le cahier des charges de la version originale de 802.11 est composée de deux configurations de réseau de base [Silvia 2002].

- **Mode Infrastructure** : Dans ce mode les stations mobiles communiquent entre elles par le



biais d'un PA (Point d'Accès) dans une zone de couverture donnée, appelée cellule appelée BSS (Basic Service Set). Le PA fournit aux stations l'accès au médium à tour de rôle, à l'aide d'un dispositif appelé PCF (Point Coordination Function) (Figure I.3.a).

– **Mode Ad Hoc** : Les stations mobiles dans la cellule communiquent entre elles indépendamment de n'importe quel support d'infrastructure. La cellule appelée également IBSS (Indépendant Basic Service Set) est caractérisée par un identifiant IBSS\_ID contrôlé localement. Les unités sont synchronisées simplement grâce à la flexibilité de l'algorithme DCF (Distributed Coordination Function) ou RTS/CTS (Request To Send / Clear To Send) (Figure I.3.b). Les stations mobiles qui se trouvent dans la même zone de couverture, communiquent entre elles d'une façon directe. Cette communication est de type pair-à-pair sans aucun protocole de routage. Ce mode de fonctionnement représente le type le plus basique des réseaux Ad Hoc

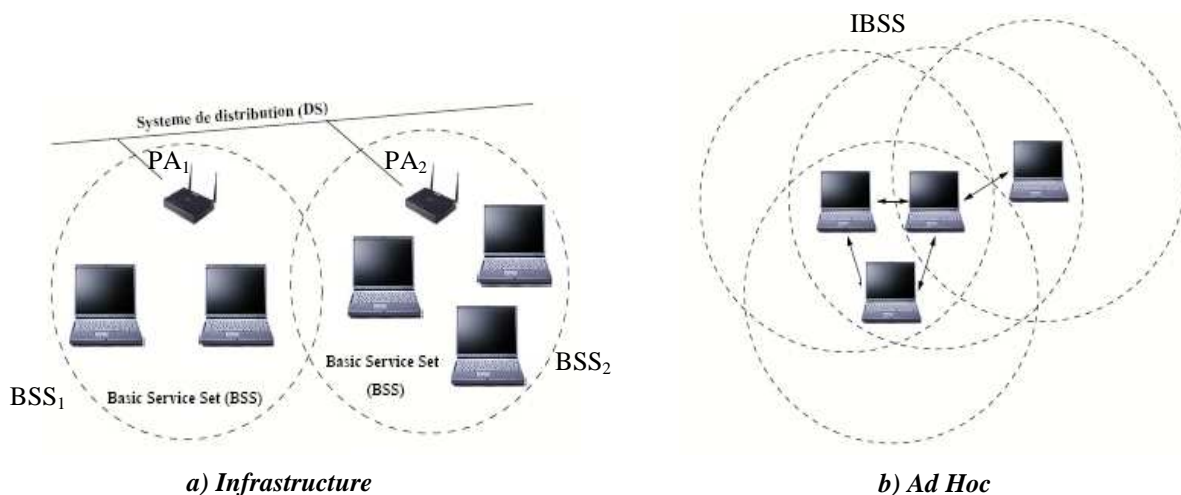


Figure I.3 : Modes de fonctionnement des réseaux WLAN

#### I.1.1.4 Méthodes d'accès au médium sans fil

Les réseaux Ethernet sont pourvus d'une technologie CSMA/CD (*Carry Sense Medium Access/Collision Detection*) permettant aux machines d'écouter le support filaire pendant qu'elles émettent. Cette caractéristique permet de détecter les collisions. Le CSMA/CD ne peut être implanté dans un environnement radio, puisque les liaisons radio utilisées ne sont pas full-duplex (on ne peut écouter et émettre en même temps) et les WLAN n'ayant évidemment pas cette capacité. Le mécanisme d'accès est conçu pour éviter les collisions. Alors la sous couche MAC de 802.11 offre une autre technique appelé CSMA/CA (*Collision Avoidance*) afin d'éviter les collisions et accéder au support sans fil tout en restant évolutive.

Le protocole MAC de l'IEEE 802.11 incorpore trois méthodes d'accès basées sur la technique CSMA/CA. La méthode PCF (Point Coordination Function) est une méthode

d'accès centralisée utilisée en mode infrastructure, elle utilise un point d'accès coordonnateur pour arbitrer le droit d'accès à tour de rôle aux stations. Les méthodes DCF (Distributed Coordination Function) et RTS/CTS (Request To Send/Clear To Send) sont utilisées en mode Ad Hoc.

DCF est la méthode d'accès de base du protocole MAC, son fonctionnement est décrit par la Figure I.4. Lorsque la station A veut transmettre une trame de données, elle écoute d'abord le support. Si le support est libre pour un intervalle de temps DIFS (DCF Interframe Space), la station A transmet sa trame de données. Si la trame est reçue avec succès par la station B, ce dernier attend un temps SIFS (Short Interframe Space) et renvoie un accusé de réception Ack (Acknowledgement) à la station B.

Lorsque le support est occupé pendant l'intervalle DIFS (i.e., d'autres stations entrains de transmettre des données), la station A utilise un temporisateur appelé NAV (Network Allocation Vector), lui permettant de différer ses transmissions. Ce NAV s'applique à toutes les stations et elles n'ont la capacité d'émettre qu'après la fin du NAV. Puis elle calcule un délai aléatoire appelé (Backoff) dans un intervalle appelé CW (Contention Window). Quand le support est libre et après un nouveau DIFS, la station A décrémente son temporisateur jusqu'à 0 puis la trame des données est transmise.

A noter que DIFS est beaucoup plus grand que SIFS afin d'accorder la priorité aux accusés de réception sur les trames de données. La station A considère la non réception d'un acquittement (Ack) comme une collision. Dans ce cas la trame de données est considérée comme perdue et une retransmission est programmée après un EIFS (Extended Interframe Space) [Conti 2003].

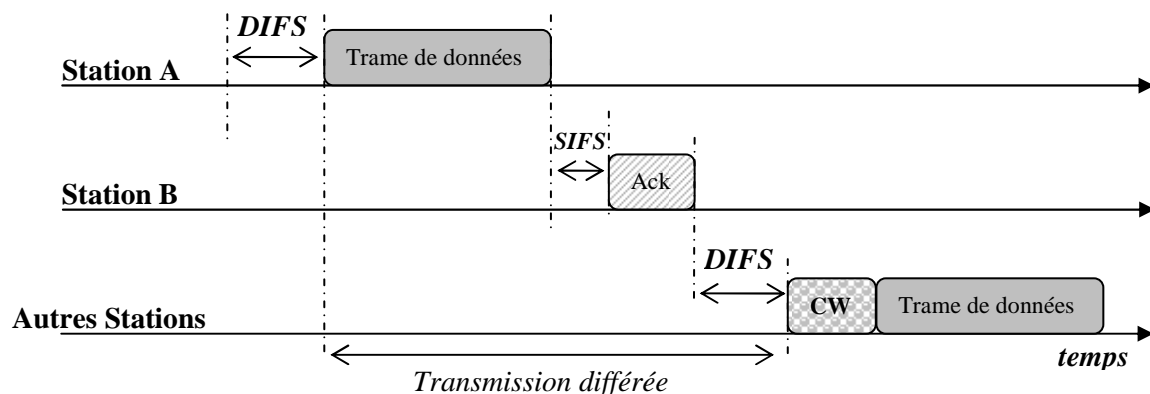


Figure I.4 : La méthode d'accès DCF

La méthode RTS/CTS est optionnelle, elle peut être activée ou désactivée dans le protocole MAC. Une station désirant émettre des données envoie un RTS, les stations de l'IBSS lisent ce RTS et initialisent leur NAV en fonction des paramètres contenu dans ce RTS. La station destination répond, après un SIFS, par un CTS, de nouveau les autres stations

mettent à jour leur NAV en fonction de ce CTS. La station source, ayant reçu ce CTS, est assurée que le support est réservé pour sa transmission (Figure I.5).

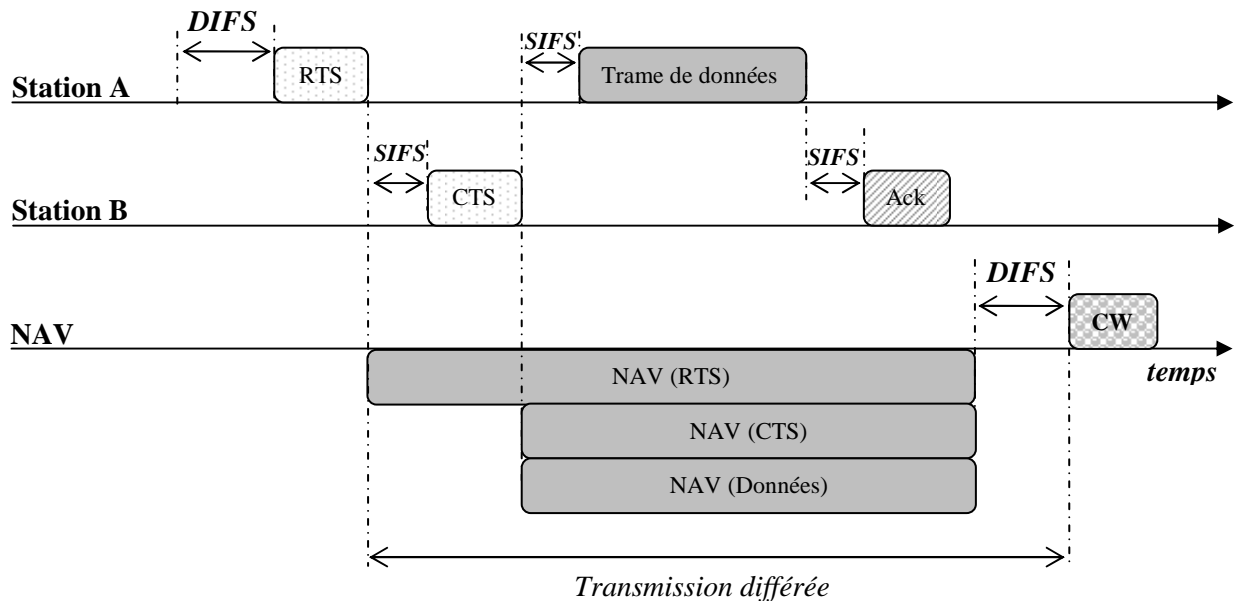


Figure I.5 : La méthode d'accès RTS/CTS

Cette méthode est plutôt utilisée pour l'envoi de longues trames qui feraient chuter les performances en bande passante en cas de collision. On peut justement calculer un seuil permettant d'utiliser ou non le mécanisme RTS /CTS (RTS Threshold). Une deuxième application, très utile pour l'univers des liaisons radio, est la détection des stations cachées [Conti 2003].

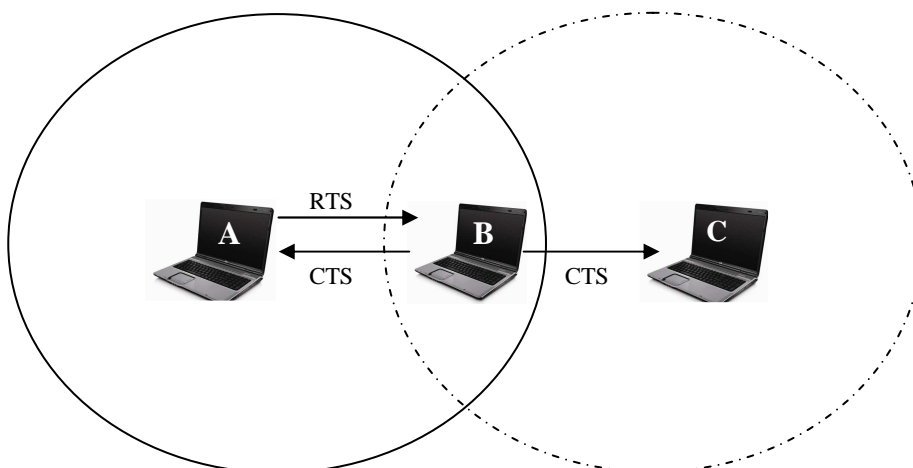


Figure I.6 : Problème de la station cachée

Deux stations peuvent être hors de portée radio l'une de l'autre tout en étant dans le même IBSS. Si elles veulent émettre en même temps il va y avoir collision. Par contre s'il y a

réserve avant transmission par la fonction RTS/CTS les stations cachées de la station source, vont quand même détecter le CTS du point d'accès. Il est à noter que des collisions peuvent se produire entre trames RTS, mais de part leur petite taille, la bande passante n'est pas trop affectée.

### **I.1.2 Caractéristiques et contraintes de communication dans les réseaux Ad Hoc**

En général, un réseau Ad Hoc mobile est considéré comme un système autonome dynamique composé de nœuds mobiles interconnectés par des liens sans fil, sans l'utilisation d'une infrastructure fixe et sans administration centralisée. Les nœuds sont libres de se déplacer aléatoirement et s'organisent arbitrairement. Par conséquent, la topologie du réseau peut varier de façon rapide et surtout imprévisible.

Les différences qui distinguent le monde des réseaux Ad Hoc sans fil du monde des réseaux filaires sont multiples. Il s'agit de réseau radio dont le signal véhiculant l'information est soumis à toutes les contraintes de la propagation dans l'air. L'atténuation d'un signal radio dans l'air est rapide à cause des conditions climatiques et les obstacles qui séparent les nœuds. L'impossibilité de détecter les collisions dans le médium sans fil augmente le surcoût du protocole d'accès par rapport au médium filaire. Cette augmentation est traduite par les différents temporisateurs (SIFS, DIFS, Ack, RTS/CTS etc. pour la norme IEEE 802.11) utilisés pour éviter les collisions.

Par ailleurs, ces réseaux sont mobiles, leur topologie n'est a priori pas maîtrisée et les protocoles usuels d'Internet ne sont pas toujours adaptés à des changements fréquents de topologie. Il faut aussi prendre en compte des problématiques particulières de sécurité ou encore de consommation d'énergie.

Malgré la mise sur le marché, très tôt, de la technologie sans fil, les applications basées sur le paradigme des réseaux Ad Hoc restent encore peu développées. Pour une exécution pratique d'un protocole réseau Ad Hoc, plusieurs défis doivent être relevés ; les principaux sont les suivants :

- **Topologie dynamique** : Puisque les nœuds d'un réseau Ad Hoc peuvent être arbitrairement placés dans une région donnée, leur topologie est généralement non structurée. En raison de la mobilité des nœuds et/ou de la déconnexion de certains liens, leur topologie est aussi dynamique. Dans ces conditions, optimiser les performances des réseaux Ad Hoc ce n'est pas une tâche facile.
- **Communication de basse qualité** : Les communications dans un médium sans fil sont beaucoup moins fiables que dans un médium filaire. En outre, la qualité de communication est influencée par des facteurs environnementaux (conditions climatiques, présence des obstacles, multi-trajet, interférences avec d'autres réseaux sans fil, etc.), qui changent avec le temps. Les nœuds du réseau Ad Hoc doivent prendre en compte les états variables du lien, en tolérant les intervalles de temps où le lien sans fil est hors service.

- **Ressources restreintes** : Les réseaux Ad Hoc sont caractérisés par la rareté des ressources ; en particulier, l'énergie et la bande passante. Ces derniers sont disponibles en quantités très limitées en comparaison avec les réseaux filaires. Les protocoles pour les réseaux Ad Hoc doivent fournir le niveau des performances désiré en consommant le moins de ressources possible.
- **Economie d'énergie** : Chaque nœud mobile est équipé par une batterie qui contient une quantité limitée d'énergie, un des buts primaires de conception est d'employer cette quantité limitée d'énergie aussi efficacement que possible.
- **Scalabilité** : Dans certaines applications, le réseau peut se composer de centaines ou de milliers de nœuds. Ceci signifie que les protocoles doivent pouvoir être efficacement opérationnels en présence d'un nombre très grand de nœuds.

En cas des réseaux Ad Hoc multiplateformes, les questions suivantes doivent également être abordées :

- **Interopérabilité** : Dans le cas des réseaux composés de plusieurs sous réseaux de nature différentes, les données traversent plusieurs plateformes de réseaux différents : Ad Hoc, Cellulaire, Satellite, Wireless LAN, Internet, et ainsi de suite. Il n'est toujours pas défini : quelles règles devraient être appliquées pour qu'un nœud se déplace entre différents plateformes de réseaux, sans perdre la connexion ? L'interopérabilité entre les protocoles des réseaux hétérogènes est une tâche très difficile.
- **La nécessité de la coopération entre les nœuds** : Dans la conception de certains protocoles, on suppose souvent que tous les nœuds participent de la même manière à l'exécution de ce protocole. Cependant, les applications réseaux ont des profils très variées, (utilisateurs privés, professionnel, utilisateurs avec droits ou droits restreints, etc.) et dont la participation dans l'exécution de protocoles n'est pas garantie. Ainsi, des nœuds de réseau doivent être stimulés d'une façon ou d'une autre pour se comporter selon les spécifications de protocole (protocole de routage...).

Les applications des réseaux Ad Hoc sans fil sont nombreuses (domaine militaire, civil, sanitaire...). Dans le domaine civil (Figure I.6), les voitures dotées d'équipements sans fil (Wi-Fi, GPS) peuvent échanger des informations sur l'état du trafic routier (embouteillage, accident, travaux, urgence...). Alternativement, les voitures elles-mêmes agissent en tant que relais d'information de sorte que les mises à jour du trafic puissent rapidement atteindre des conducteurs lointains. Ces informations peuvent être recueillies depuis un point d'accès sur l'autoroute.

Les applications des réseaux Ad Hoc deviennent de plus en plus gourmandes de point de vue ressources (les applications multimédias), et ont des exigences en termes de délais (comme exemple les applications temps réel), ou en terme de sécurité (applications de paiement sécurisé). En 2003, L'IRTF (Internet Research Task Force) a créé le groupe (Ad Hoc Network Scaling) pour étudier le comportement de ces réseaux afin d'examiner les

problématiques liées à ce type de réseau telles que l'interaction entre les différentes couches, l'auto-configuration des mobiles, les problèmes de routage et surtout l'intégration du support de QoS pour répondre aux exigences des différentes applications des réseaux sans fil Ad Hoc.

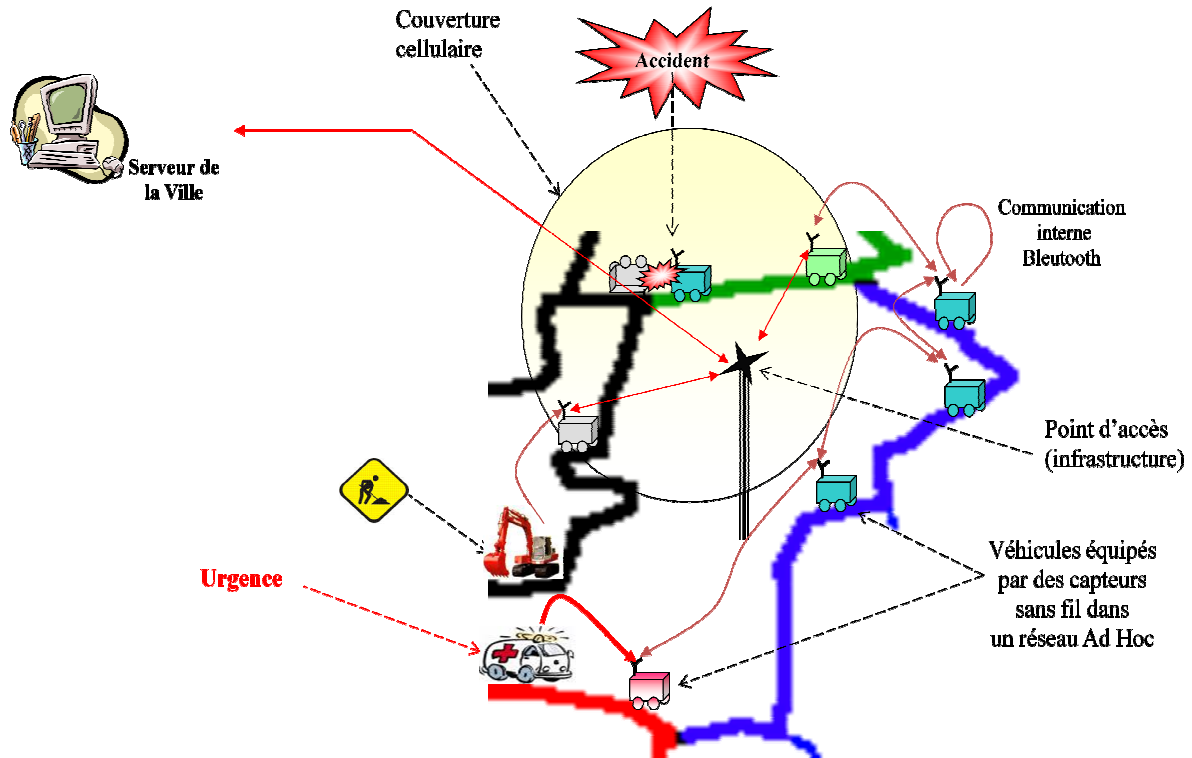


Figure I.7 : Exemple d'un réseau Ad-Hoc civil

### I.1.3 Notions et paramètres de la Qualité de Service

Les réseaux Ad Hoc sans fil supportent de plus en plus d'applications multimédias, qui peuvent alors générer des flux de type : informatique (transfert de fichiers, transactionnel, interactif, etc.), voix (flux audio), ou images (flux vidéo). En fonction du flux considéré, des exigences en termes de délais d'acheminement et de bande passante doivent être satisfaites. Les problèmes de la QoS dans les réseaux sans fil Ad Hoc deviennent de plus en plus complexes. Cela dit, des avancées majeures ont été réalisées au cours de ces dernières années. [Van 2003, Khoukhi 2006] et [Chanet 2007] sont des références pour un récapitulatif sur le routage avec QoS. [Satyabrata 2003] présente une revue exhaustive de l'état de l'art de la QoS.

Plusieurs définitions de la QoS ont été proposées. Crawley [Crawley 1998] définit la QoS comme « un ensemble d'exigences de service à garantir par le réseau tout en transportant un flux de paquets de la source vers la destination ». Dans le domaine des réseaux sans fil Ad Hoc, la QoS désigne tout mécanisme permettant d'adapter le comportement du réseau aux besoins des applications. La QoS permet une meilleure adaptation des applications aux

différents états du réseau, en se basant sur plusieurs paramètres mesurables sur le réseau, dont les plus importants sont :

- **La bande passante (Bandwidth)** : c'est le volume maximal d'informations par unité de temps que peut absorber un lien entre deux nœuds sans créer de file d'attente. A un instant donné, le lien doit disposer d'assez de bande passante pour absorber le trafic généré par l'application.
- **Le délai de bout-en-bout (End-To-End Delay)** : c'est le temps mis pour transférer un paquet entre un nœud source et un nœud destination. les applications de type audio/vidéo exigent des délais plus courts que celles de type messagerie et de transfert de fichiers.
- **Le taux de perte de paquets (Packet loss ratio)** : c'est le rapport de nombre de paquets perdus sur le nombre de paquets émis. Contrairement aux applications de type audio/vidéo, les applications de type messagerie et transfert de fichiers ne tolèrent pas la perte des paquets de données.
- **La gigue (jitter)** : c'est la variation des délais de bout-en-bout des paquets de même flux entre la source et la destination. La présence de gigue dans les flux peut provenir des changements d'intensité de trafic sur les liens. Les applications multimédia (audio/vidéo) exigent un acheminement régulier du trafic.

Les flux engendrés par les applications étant très divers (audio/vidéo, messagerie, data, transfert de fichier...), ils donneront lieu à des mises en œuvre variées selon le niveau de la QoS exigée par les applications [Kui 2001, Hurbain 2003].

### I.1.3.1 La QoS dans les réseaux sans fil Ad Hoc

Le médium radio ne présente pas les mêmes caractéristiques qu'un médium filaire. Le spectre radio est une ressource rare et fortement réglementée. Le débit d'informations transmissibles sur un canal de bande passante donnée est limité (travaux de Henry Nyquist en 1924 puis Claude Shannon en 1948) [Chaudet 2004]. Or, il ne sera pas possible d'accroître indéfiniment la bande passante allouée aux communications radio. Il est donc certain que le besoin de solutions de QoS performantes et adaptées aux spécificités de ce type de réseaux se fera rapidement sentir.

Les applications supportées par les réseaux Ad Hoc sont de plus en plus diverses et complexes. Par ailleurs, plusieurs exigences sur les paramètres de la QoS doivent être satisfaites. Les applications multimédias par exemple, exigent une grande QoS en termes de bande passante. Cette dernière est très limitée et partagée entre les nœuds du réseau Ad Hoc, donc elle représente un intérêt primordial.

La fonction de garantir la QoS dans les réseaux Ad Hoc est généralement distribuée entre les différents nœuds du réseau. Ce qui implique la résolution de nombreux problèmes parmi lesquels :

- La topologie dynamique du réseau rend la mise en œuvre de mécanisme de QoS difficile
- La pénurie des ressources dans les réseaux Ad Hoc, en particulier la bande passante. Ce là signifié que le mécanisme de QoS doit consommer le minimum de ressources possible.
- Les interruptions des connexions entre les nœuds, dues à des changements fréquents de chemin emprunter par le flux de données.
- La fragilité des liens sans fil à cause des caractéristiques électromagnétiques du médium d'accès (interférence, multi-trajet, effet Doppler etc.) et son rapport avec les changements de l'environnement qui peuvent brusquement survenir dans l'atmosphère où se trouve le réseau Ad Hoc sans fil.

Donc les besoins en QoS pour les applications dans les réseaux sans fil ne sont pas les mêmes dans les réseaux filaires. Ainsi, plusieurs approches sont mises en œuvre pour répondre à ces besoins ce que nous appelons les modèles de la QoS.

### **I.1.3.2 Modèles de la QoS**

L'introduction de la QoS dans un réseau signifie : répondre aux exigences des applications selon le type de flux généré. Ces exigences sont traduites en termes de paramètres de QoS. L'intégration de la QoS doit se faire en plusieurs niveaux. A chaque niveau de service correspond un niveau d'exigence.

L'IETF (Internet Engineering Task Force) a défini deux types d'architectures de la QoS dans le réseau Internet, il s'agit du modèle IntServ (Integrated Services) [Wroclawski 1997a] et le DiffServ (Differentiated Services) [Chan 2003]. L'IntServ est conçu pour supporter les applications temps réel en contrôlant les délais de bout-en-bout pour chaque flux de données. Ce modèle comporte trois principaux niveaux de services : (Best Effort service), (Controlled Load service) [Wroclawski 1997b] et (Guaranteed service) [Shenker 1997]. Le DiffServ définit deux classes de trafic, les différents flux s'intégrant à une de ces classes afin de bénéficier des garanties correspondantes. La classe EF (Expedited Forwarding) [Jacobson 1999], assure un délai, une gigue et un taux de pertes faibles ainsi qu'une bande passante minimale garantie. Elle est destinée aux applications temps réel telles que la vidéo ou la voix. La classe AF (Assured Forwarding) [Heinaneen 1999], permet aux applications de définir finement le taux de pertes admissible. Quatre sous-classes sont définies. A chaque sous-classe est allouée une proportion de la bande passante [Chaudet 2004].

Actuellement, Internet supporte seulement le service (Best Effort), dans le sens qu'il fera son meilleur pour transporter les paquets d'utilisateur à leur destination prévue. L'IntServ et DiffServ ne représentent pas la solution parfaite en matière de QoS pour Internet et encore moins pour les réseaux Ad Hoc sans fil. Des modèles conçus pour les réseaux Ad Hoc sont apparus ces dernières années, comme INSIGNIA [Lee 2000], SWAN [Ahn 2002], FQMM [Xiao 2000] et Inter-Couches [Chen 2002].



Le modèle INSIGNIA est une adaptation du modèle IntServ aux réseaux Ad Hoc le contrôle de la QoS est effectué périodiquement de manière décentralisée pour chaque flux de données. Il distingue deux classes de trafic : le trafic (Best-Effort) et trafic temps réel, qui correspond à des flux adaptatifs exprimant leurs exigences de QoS par deux niveaux de bande passante : [Min, Max], tandis que le protocole MAC est supposé gérer la QoS [Labioud 2006].

Le modèle SWAN est une adaptation du modèle DiffServ aux réseaux Ad Hoc, il offre une garantie de QoS par classe. Il utilise les mêmes classes de trafic qu'INSIGNIA (temps-réel et Best-Effort). Avant qu'un nœud source envoie un trafic temps réel, un algorithme dans SWAN sonde le lien menant au nœud destination pour identifier la bande passante disponible à cet instant. La bande passante non utilisée par la classe du trafic temps réel, est attribuée à la classe du trafic (Best Effort) [Labioud 2006].

Le modèle FQMM (a Flexible Quality of Service Model for Mobile Ad Hoc Networks) [Xiao 2000], définit une architecture hybride adaptée à des réseaux Ad Hoc. Ce modèle combine la QoS par flux (du modèle IntServ) pour une petite partie du trafic, et la QoS par classe (du modèle DiffServ) pour le reste du trafic. Il utilise la réservation explicite de bande passante [Chaudet 2004].

Le modèle Inter-Couches (Cross-layering) [Nahrstedt 2004, Labioud 2006], où les différents couches coopèrent en échangeant les informations relatives aux différents paramètres (bande passante, délais,...) afin d'offrir la QoS demandée [Labioud 2006].

Il est difficile de comparer les différents modèles proposés. En effet, certains restent conceptuels et ne proposent pas de mécanisme permettant une différenciation effective de service. Dans notre travail, nous proposons des techniques pour estimer la bande passante disponible. Ces dernières, sont utilisées comme des outils de mesure dans ces modèles afin de garantir aux classes de données le niveau souhaité de QoS, selon leurs exigences en matière de bande passante disponible à un instant donné [Chaudet 2004].

### **I.1.3.3 Protocoles de routage avec QoS**

Les réseaux Ad Hoc se caractérisent par une absence d'infrastructure, une gestion décentralisée et une topologie dynamique. Pour qu'une communication soit possible, au moins une route doit exister entre la source et la destination. Dans ce type de réseau, chaque nœud doit donc posséder des capacités de routage, c'est le routage dit Ad Hoc. Grâce à ce routage, la portée radio d'un nœud peut être virtuellement étendue en utilisant ses voisins comme relais de l'information.

Nous pouvons distinguer trois grandes familles de routage Ad Hoc, les protocoles réactifs ou (On Demand protocols), exemple AODV [Perkins 2003a], DSR [Johnson 2004], les protocoles proactifs ou (Table-Driven protocols) exemple OLSR [Clausen 2003], TBRPF [Ogier 2004] et les protocoles hybrides qui combine les deux premiers, exemple ZRP [Haas 2002]. Avec l'apparition des systèmes de positionnement bas coût [Kara 2006], un autre type

de routage basé sur la position des nœuds du réseau a été développé, se sont les protocoles géographiques [Ermel 2004]

En plus de trouver une route entre la source et la destination, certains flux (temps réel, audio/vidéo...) exigent que cette route satisfasse certains critères de QoS (délais, bande passante, ...). Dans ce cas, nous parlons du *routage avec QoS*. Le but du routage avec QoS est de trouver des routes satisfaisant les contraintes de différent type d'application (multimédias, temps réelles,...). Dans leurs versions natives les protocoles cités ci-dessus ne gèrent pas la QoS. Cependant, il existe des protocoles orientés QoS dès leur conception comme le protocole CEDAR [Sivakumar 1999] et CIVIC [Hou 2005].

Trois types de métriques sont utilisés dans le routage avec QoS :

1. *Additive* : Les métriques locales sont sommées tout le long du chemin (exemple : le délai, la gigue) ;
2. *Concave* : Seules les valeurs minimales de la métrique le long de la route sont retenues (cas de la bande passante) ;
3. *Multiplicative* : Les métriques sont multipliées entre elles le long du chemin (cas de la probabilité d'arrivée de paquets).

Si le protocole de routage ne prend en compte qu'une seule métrique de QoS, (e.g. la Bande passante ou le délai) nous parlons dans ce cas là du *routage mono critère*. Il s'agit d'un problème de plus court chemin. En appliquant l'algorithme de Dijkstra le chemin de coût minimal vers la destination peut être trouvé.

Cependant dans le cas du *routage multicritères*, la route trouvée doit satisfaire plusieurs critères en même temps. Dans le cas des réseaux filaires, si plus d'une métrique additive ou/et multiplicative sont utilisées dans le routage, alors la recherche d'une route est un problème NP-Complexe [Labiod 2006]. La solution est d'établir une hiérarchie entre les métriques selon leur importance par rapport aux exigences des applications [Badis 2004].

Des adaptations sont introduites sur les protocoles de routages classiques afin d'intégrer la QoS. Exemple, le protocole OLSR enrichi avec un support de QoS est baptisé QOLSR [Ge 2003, Moraru 2006, Badis 2004, Labiod 2006]. Pour QOLSR le nombre de sauts n'est pas le seul critère de recherche. Ce protocole utilise également le délai et la bande passante comme critères de recherche du plus court chemin [Badis 2003]. Le protocole AODV est modifié pour utiliser ses messages de contrôle, afin de gérer la QoS [Perkins 2003b, Labiod 2006]

Afin d'intégrer un routage avec QoS, [Chaudet 2004] propose de déployer une architecture hiérarchique des réseaux Ad Hoc appelée MMWN (Multimédia support for Mobile Wireless Networks). Au-dessus de cette architecture, un service de localisation des mobiles ainsi qu'un algorithme de routage de type état de lien sont déployés. L'algorithme choisit la route présentant les meilleures caractéristiques par rapport à la métrique considérée puis, s'il y a plusieurs chemins équivalents, choisit le plus court en nombre de sauts.

Le protocole CEDAR (a Core Extraction Distributed Ad Hoc Routing algorithm) [Sivakumar 1999, Khoukhi 2006] est destiné aux réseaux de faibles dimensions et relativement stables car il est basé sur l'élection d'un noyau de réseau répondant aux exigences de la QdS. Le but de CEDAR est de permettre un routage basé sur des informations de l'état du lien et la *bande passante disponible*. Un mécanisme de routage robuste et raisonnable doit calculer le chemin approprié sans dégrader la performance globale du réseau. Même si l'on garantit la QdS dans les couches supérieures du réseau, les réseaux sans fil Ad Hoc restent moins performants sans un support de QdS intégré au protocole MAC IEEE 802.11.

#### **I.1.3.4 La Couche MAC avec QdS**

Le problème de réservation de la bande passante dans les réseaux filaires est polynomial, tandis qu'aux réseaux sans fil, le problème est NP-Complet [Labiod 2006]. Cette complexité est due aux interférences que peut subir le médium sans fil et au non déterminisme du protocole MAC IEEE 802.11. Ce dernier utilise l'algorithme de (Backoff) qui permet aux stations d'accéder au médium avec la même probabilité, mais sans garantie de délai [Labiod 2006]. Ce qui rend impossible de garantir une QdS stricte dans le monde sans fil. Des approximations de la bande passante consommée par un flux au niveau MAC sur chaque nœud dans sa zone d'interférence, sont obtenues à l'aide des modèles analytiques validés par simulation [Nguyen 2005].

Un protocole MAC avec QdS idéale : doit être strictement déterministe en accordant l'accès au médium pour le paquet en attente avec la plus grande priorité. En outre, il doit fournir les informations concernant la QdS au niveau MAC, sur le temps d'attente maximum d'un paquet avant d'être transmis, le taux d'occupation du médium et le taux de réussite de transmission des paquets.

Dans [Chen 1997, Hsu 1997, and Lin 2000], un support de QdS est conçu dans la couche MAC avec un protocole TDMA (Time Division Multiple Access), afin d'affecter les slots de temps "time slot" (unité de temps la plus petite, variant suivant la couche physique) libre aux paquets en attente pour éviter les collisions. Cette technique nécessite une synchronisation d'horloges des nœuds du réseau, le coût de cette synchronisation est très élevé dans les réseaux Ad Hoc à cause de la mobilité des nœuds.

La norme IEEE 802.11 ne fournit que le service (Best-Effort) sans prévoir la QdS, ainsi plusieurs solutions ont été récemment proposées pour intégrer le support de QdS dans cette norme. Les auteurs de [Barry 2001] ont tenté de fournir la différenciation de service dans la couche MAC en manipulant la fenêtre de contention CW (Contention Window) associée à l'algorithme (Backoff). La modification de l'algorithme de (Backoff) est proposée dans [Kang 2001] afin de produire plusieurs classes de service. [Sheu 2001] propose des modifications dans l'algorithme d'évitement de collision de IEEE 802.11 en implémentant un mécanisme sophistiqué d'allocation de bande passante.

IEEE 802.11e [IEEE 2001] propose un support de QoS avec l'intégration de deux nouvelles méthodes d'accès, EDCF (Enhanced Distributed Coordination Function) et HCF (Hybrid Coordination Function). Le mode HCF étant intermédiaire entre DCF et PCF, celui-ci permet d'avoir une qualité de service améliorée par rapport à DCF. Le mode EDCF définit quatre catégories d'accès aux canaux ou priorités : une priorité pour l'audio ; une pour la vidéo ; (Best Effort) pour les applications standards et une priorité dite (Backlog) lorsque le trafic est faible [Berlemann 2006]. IEEE 802.11e gère quatre catégories de trafic mais il n'est toujours pas déterministe, il garantit seulement qu'en moyenne le temps d'accès au médium d'un message plus prioritaire est plus faible [Berlemann 2006]. Akyildiz [Akyildiz 2005] donne une présentation exhaustive des différents le protocole MAC possible dans les réseaux Ad Hoc sans fil.

### **I.1.3.5 Les réseaux WLAN multi-supports**

Le multi-support consiste à utiliser plusieurs technologies radio afin qu'un nœud puisse choisir le support le plus adapté en fonction du type d'informations à envoyer, du contexte et de la bande passante disponible au moment de l'émission. Cette redondance des moyens de communication permet d'améliorer la QoS au niveau du nœud lui-même.

Par exemple, un nœud sans fil peut intégrer les supports ZigBee et l'IEEE 802.11b. Ces deux technologies sont complémentaires car elles permettent aux nœuds du réseau de disposer d'un support avec une large bande passante et un autre support consommant peu d'énergie [Chanet 2007]. Un nœud peut ainsi adapter son émission en fonction de ses besoins en termes de bande passante (le Wi-Fi est privilégié pour les gros volumes de données) ou en termes de ressources (le ZigBee peut être utilisé de préférence quand le niveau de batterie du nœud est faible). Cette complémentarité permet de concevoir des réseaux hétérogènes avec des nœuds multi-support et des nœuds mono-support.

De plus, si le nœud possède plusieurs supports, cela lui permet d'avoir une tolérance aux pannes et aux perturbations extérieures (les deux supports n'émettant pas dans la même bande de fréquence). L'utilisation d'autres types de supports est également envisageable en fonction des évolutions technologiques des normes radios (arrivée de l'IEEE 802.11n par exemple).

### **I.1.3.6 La Radio Cognitive**

Ces dernières années le concept de la Radio Cognitive ou (Cognitive radio) est apparaît. La Radio Cognitive est défini comme un dispositif de communication intelligent, qui est conscient de son environnement et les besoins de ces applications, et peut se reconfigurer automatiquement afin d'optimiser la QoS [Bin 2007].

Dans la Radio Cognitive un nœud sans fil change ses paramètres de transmission ou/et réception afin de communiquer efficacement en évitant l'interférence avec les autres fréquences (autorisée ou non autorisées). Ce changement de paramètres est basé sur la

surveillance active de plusieurs facteurs dans l'environnement radio, tel que le spectre de fréquence radio, le comportement du nœud et l'état du réseau.

Pour cela le nœud sans fil doit incorporer des techniques avancées de traitement des signaux (par exemple, accès dynamique au spectre, gestion automatisée du spectre de réseau), en utilisant intelligemment la connaissance situationnelle et les expériences précédentes pour répondre aux besoins des applications et améliorer leur exécution. La Radio Cognitive permet aussi l'intégration de plusieurs interfaces radio afin d'améliorer la QoS dans un nœud sans fil. [Akyildiz 2005, Bin 2007] sont des références très intéressantes sur la Radio Cognitive.

## I.2 Estimation de la Bande Passante Disponible (BPD)

Le but d'un protocole de routage avec QoS est de fournir des routes qui satisfassent un ou plusieurs critères de la QoS. Dans les réseaux Ad Hoc, le critère le plus souvent étudié après le nombre de sauts est la bande passante. La mise en place d'un protocole de QoS efficace nécessite donc une estimation précise de la bande passante disponible. Or cette métrique est difficilement quantifiable dans un environnement Ad Hoc multi-sauts. En effet, le médium étant partagé, la perception de la bande passante utilisée et disponible est différente d'un mobile à un autre.

Plusieurs solutions ont été proposées pour estimer la bande passante. Ces solutions peuvent être classées en deux grandes catégories : Les techniques actives basées sur l'envoi des paquets de contrôle et de sondage, et les techniques passives qui préconisent une estimation locale de la bande passante disponible. Avant d'aborder le détail de ces techniques, certaines notions et paramètres liés à l'estimation de la bande passante sont nécessaires.

### I.2.1 Notions et paramètres de la bande passante

#### I.2.1.1 Bande passante

Au niveau de la couche physique, le terme *Bande Passante* est lié à la largeur du spectre du signal électromagnétique, aux techniques de modulation/démodulation et aux caractéristiques de sa propagation dans le système de communication. Au niveau de la couche IP, la *Bande Passante* représente le débit de transfert des données par unité de temps, qu'un lien ou un chemin (un saut ou plusieurs sauts dans les réseaux sans fil) peut supporter dans un réseau de communication [Prasard 2003].

#### I.2.1.2 Capacité

La *Capacité* d'un seul lien (un saut), est la quantité maximum de transfert de données par unité de temps qu'un lien (un saut) peut supporter. Au niveau de couche IP, l'encapsulation des paquets de données et les trames de contrôle sont inclus dans le calcul de la capacité. En outre, les collisions et les périodes de contentions du protocole CSMA/CA rendent la Capacité réelle offerte aux applications, très faible par rapport à la Capacité

théorique offerte par les technologies des réseaux sans fil (Figure I.8). Contrairement à la

Capacité au niveau IP, la Capacité au niveau physique ne dépend que des caractéristiques physiques du médium.

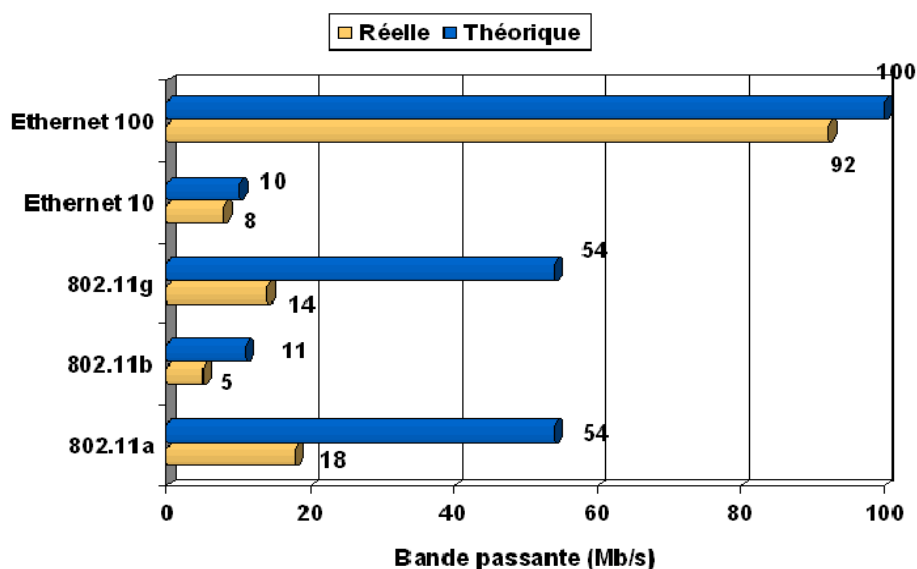


Figure I.8 : Les bandes passantes théoriques et réelles des différents standards d'après [Pujolle 2003]

### I.2.1.3 Bande passante disponible

La bande passante disponible (Available Bandwidth) ou BPD est un paramètre très important pour une QoS de bout-en-bout dans les réseaux Ad Hoc. La BPD d'un lien (d'un saut) est la part de la capacité non utilisée de ce lien pendant une période de temps. Ainsi la BPD dépend du trafic qui circule dans ce lien. Ce trafic est un paramètre très fluctuant et il détermine la charge du réseau dans le temps.

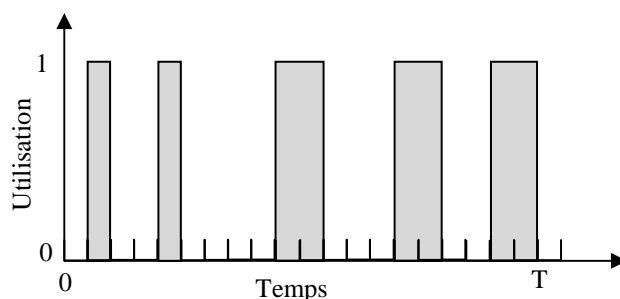


Figure I.9 : Utilisation instantanée du médium pendant une période  $[0, T]$

La Figure I.9 illustre l'utilisation instantanée du médium. A n'importe quel instant, l'état de médium est libre ou entrain de transmettre des données en utilisant la totalité de la

capacité du lien, alors pour que la BPD soit significative, il faut qu'elle soit définie sur une période de temps  $\tau$  en utilisant la moyenne d'utilisations instantanées pendant cette période  $\bar{u}(t-\tau, t)$  :

$$\bar{u}(t - \tau, t) = \frac{1}{\tau} \int_{t-\tau}^t u(x) dx \quad (\text{I. 1})$$

Tel que  $u(x)$  est l'utilisation instantanée du médium à l'instant  $x$ . Pour l'exemple décrit dans la Figure I.9 la moyenne d'utilisation est de 40 % pendant la période du temps  $\tau$ .

Comme le montre la Figure I.10, un saut dans un réseau Ad Hoc est représenté par un tuyau. La largeur du tuyau correspond à la capacité de lien, la partie hachurée est l'utilisation moyenne du lien pendant une période de temps. Un chemin est une concaténation de tuyaux.

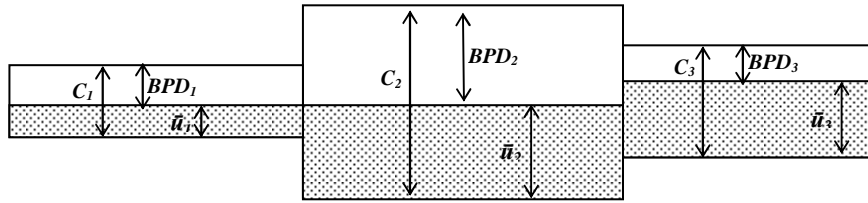


Figure I.10 : Le trafic de données dans un chemin à 3 sauts

De cette représentation nous pouvons en déduire ce qui suit :

- La  $BPD_i$  moyenne d'un saut  $i$  est donné par :

$$BPD_i = (1 - \bar{u}_i) C_i \quad (\text{I. 2})$$

Tel que  $\bar{u}_i$  et  $C_i$  sont respectivement l'utilisation moyenne et la capacité du saut  $i$ . La capacité minimum d'un lien détermine la capacité de chemin de bout-en-bout entre la source et la destination, ainsi la  $BPD_i$  minimum d'un lien détermine la  $BPD$  de chemin bout-en-bout entre la source et la destination (Equation I.3 et Equation I.4).

$$BPD = \text{Min} (BPD_1, BPD_2, \dots, BPD_i, \dots, BPD_h) \quad (\text{I. 3})$$

$$C = \text{Min} (C_1, C_2, \dots, C_i, \dots, C_h) \quad (\text{I. 4})$$

Tel que  $h$  est le nombre de sauts du chemin entre la source et la destination.

#### I.2.1.4 One Way Delay (OWD)

C'est le délai de transit d'un paquet à travers un réseau complet (Figure I.11). Il est donné par le temps entre l'émission du premier bit du paquet par la source et la réception du

dernier bit du paquet par le destinataire [Almes 1999]. Pour chaque paquet, la mesure de l'OWD nécessite le marquage de l'instant d'envoi par la source et l'instant de réception par la destination. OWD est composé de :

- *Délai d'attente* ( $q_i$ ) : c'est le temps où un paquet passe dans la file d'attente du lien  $i$  à cause du cross trafic ;
- *Délai de transmission* ( $x_i$ ) : c'est le temps nécessaire pour placer les bits d'un paquet sur le médium physique. Ce délai est fonction de la taille du paquet et de la capacité du lien ;
- *Délai de propagation* ( $d_i$ ) : c'est le délai de transit du signal physique entre l'émetteur et le récepteur. Il dépend de la vitesse de propagation du signal de l'ordre de  $2 \cdot 10^5 - 3 \cdot 10^5$  km/s.

Ainsi le  $OWD_k$  du paquet  $k$  est donnée par l'équation suivante :

$$OWD_k = \sum_{i=1}^h (x_i + d_i + q_k^i) = \sum_{i=1}^h \left( \frac{L_k}{C_i} + d_i + q_k^i \right) \quad (I.5)$$

Où,  $h$  est le nombre de sauts,  $L_k$  est la taille du paquet  $k$ .

Pour mesurer les OWDs, les horloges de la source et de la destination doivent être synchronisées. Hofmann [Hofmann 2000] propose d'intégrer un système d'horloges GPS, tandis que Vladimir [Vladimir 2003] propose une synchronisation par les serveurs NTP (Network Time Protocol), ce protocole permettant de synchroniser les horloges locales des systèmes informatiques à travers le réseau.

### I.2.1.5 Round Trip Time (RTT)

Certaines techniques s'intéressent à la mesure du temps aller-retour d'un paquet (RTT) pour estimer la BPD [Chenet 2006]. Le RTT est défini comme le temps d'aller d'un paquet de la source vers la destination et son retour à la source (Figure I.11). Le RTT est peut être considéré comme la somme de deux OWDs (de la source vers la destination et de la

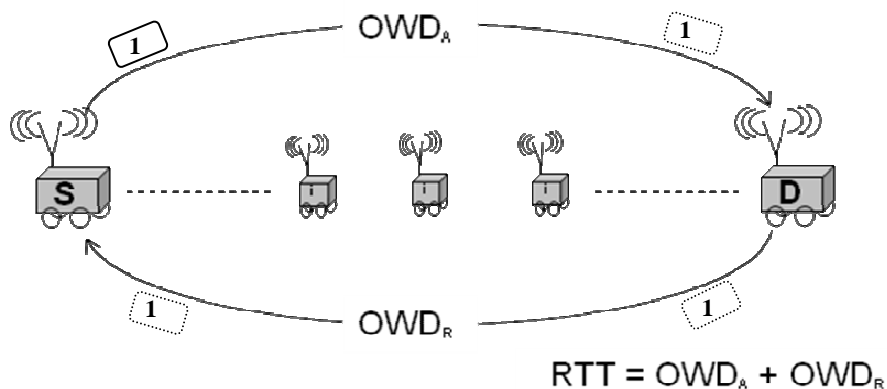


Figure I.11 : Définitions de OWD et RTT



destination vers la source). L'avantage de RTT par rapport à OWD est qu'il est plus facile à calculer et ne nécessite pas de synchronisation entre la source et la destination. La seule condition dans les mesures des RTT est que le chemin (la succession des sauts) de la source vers la destination soit le même de la destination vers la source (chemin symétrique). Souvent ce n'est pas le cas.

#### **I.2.1.6 Trafic Concurrent et Trafic de Sondage**

Le *Trafic Concurrent* ou (Cross-Traffic) est un trafic généré par un simulateur de réseau, pour modéliser le trafic réel qui circule dans le réseau Ad Hoc. Le but du *Trafic Concurrent* est de simuler la charge du réseau durant la simulation. Tandis que le Trafic de sondage, est un trafic généré par une technique active, depuis un nœud source vers un nœud destination. Le but de Trafic de sondage est de sonder le réseau afin d'effectuer des certaines mesures (BPD, délai,...).

### **I.2.2 Techniques et outils d'estimation de la BPD**

Les techniques d'estimation de la BPD peuvent se diviser en deux grandes catégories, « *Passives* » et « *Actives* ». Les techniques *Passives* utilisent des informations locales (comme par exemple le taux d'utilisation du canal). Les messages *Hello*, qui permettent la mise à jour des informations de voisinage, sont aussi utilisés pour échanger des informations de bande passante. Les techniques *Actives* basées sur l'envoi de paquets de contrôles afin de calculer les différents paramètres qui caractérisent le chemin de bout-en-bout et d'en estimer la BPD le long de ce chemin. Un état de l'art sur les caractéristiques de ces deux catégories sera détaillé dans les sections suivantes.

#### **I.2.2.1 Techniques Passives**

Pour estimer la BPD certaines techniques utilisent une stratégie passive, qui consiste à agir en qualité d'observateurs au sein d'un réseau. En général, ces techniques ne créent pas d'interférences avec d'autres trafics. Cependant, dans les réseaux filaires, ces techniques nécessitent l'accès à tous les composants des matériels réseaux (routeurs et serveurs), ceci exige des privilèges d'administration et de contrôle de réseau. Parmi les techniques utilisées dans le domaine filaire nous citons :

MRTG (*Multi Router Traffic Grapher*) [Andreas 2005a], est une technique passive qui utilise les flux entrants et sortants des routeurs pour calculer l'utilisation instantanée du réseau. La BPD est déduite en connaissant la capacité théorique du réseau. IPMON [Andreas 2005a], collecte les traces des paquets dans différents points du réseau. Les traces sont utilisées pour analyser le comportement du trafic. Cette technique permet aussi d'étudier les répartitions des paquets selon leurs tailles et les protocoles selon leurs types (ftp, mail, http etc.).

Dans les réseaux Ad Hoc sans fil quelques techniques sont apparues, mais restent encore dans la phase de simulation vue les spécificités et la complexité de ces réseaux. Nous comptant :

BRuIT [Chaudet 2002] et CACP [Yang 2005] sont des protocoles de QoS dont le but est d'estimer la BPD d'un nœud dans sa zone de détection de porteuse. Ces techniques n'estiment que la bande disponible locale d'un nœud et pas la BPD d'un lien. L'estimation est faite en utilisant les périodes de temps libre au niveau du médium. Périodiquement, chaque nœud fournit des informations sur la quantité de bande passante qu'il utilise pour router un flux, ainsi que sur celle utilisée par ses voisins, en utilisant trois méthodes différentes. BRuIT envoie des messages Hello. Le principal inconvénient de ces techniques, est que l'approximation de la zone de détection de porteuse par le voisinage à un ou à deux sauts n'est pas toujours correcte.

Dans AAC [Renesse 2005], chaque nœud additionne la taille des paquets reçus durant une période fixe pour estimer sa bande passante utilisée. Cette taille est déduite de la bande passante théorique du nœud. En fin de compte, la BPD du nœud est le minimum de la BPD des nœuds se trouvant dans la zone de détection de porteuse (voisinage à un saut). De la même manière que CACP, AAC propose aussi la prise en compte de la contention intra-flux.

La technique QoS-AODV [Renesse 2004] estime elle aussi la BPD locale d'un nœud en utilisant le ratio entre le nombre de paquets transmis et reçus, BWER (Bandwidth Efficiency Ratio). QoS-AODV utilise les messages Hello pour échanger les informations de la BPD des nœuds voisins à un saut. La BPD d'un nœud est la BPD minimum de ce nœud et celles des nœuds voisins à un saut.

Les techniques ci-dessus présentent plusieurs inconvénients. Premièrement, le calcul de la BPD locale d'un nœud est complètement différent de celle d'un chemin de bout-en-bout, entre un nœud source et un nœud destination.

Deuxièmement, le calcul des périodes libres et occupées du médium est une tâche qui nécessite des modifications dans le protocole MAC. En outre, la BPD au niveau de la couche MAC est totalement différente de celle au niveau IP [Prasard 2003]. En revanche, ce qui intéresse les applications temps réels et multimédia est la BPD au niveau de la couche IP. En plus les modèles de la QoS vus précédemment, ont besoins de connaître les valeurs de la BPD au niveau de la couche IP (contrôle d'admission de QoS)

NIMBE (Non Invasive MANET Bandwidth Estimator) est un estimateur de bande passante proposé par [Chanet 2006]. Cet estimateur est non invasif. Il est donc particulièrement adapté aux réseaux sans fil qui doivent optimiser l'usage de la bande passante. L'estimation est calculée en utilisant des temps d'aller-retour (RTT) de paquets entre la source et la destination. L'avantage de ce paramètre est principalement la possibilité de l'utiliser dans des réseaux non synchronisés temporellement. En effet, les mesures de temps sont effectuées sur le même nœud.

Les techniques passives ne gênent pas le trafic qui circule dans le réseau (techniques non intrusives). Cependant, elles ne sont pas utilisables dans des réseaux avec des privilèges d'administration [Andreas 2005a]. En plus, les techniques passives donnent un rapport sur l'état du réseau dans un instant donné, mais ne donne pas l'information exacte sur l'état du lien ou du chemin entre deux nœuds dans le réseau. Les résultats d'estimation de ces techniques sont généralement imprécis [Andreas 2005a]. Les chercheurs ont développé d'autres techniques actives afin de mesurer les caractéristiques d'un lien donné entre deux points dans le réseau.

### **I.2.2.2 Techniques Actives**

Les techniques actives sondent le réseau en injectant un trafic de sondage à partir du nœud source et mesure les changements subis par ce trafic à la destination. Ainsi, les techniques actives nécessitent l'accès aux deux nœuds communicants, la source et la destination. De telles techniques s'appellent les techniques de mesure de bout-en-bout. Le sondage n'est qu'une étape de base de la technique active. La deuxième étape consiste à analyser les données collectées pour mesurer les paramètres du lien réseau (la BPD, Capacité, OWD, RTT etc.). Il existe différents type de systèmes de sondage. Les systèmes de sondage les plus connus sont, le sondage par une paire de paquets (Packet-Pair Probing) et le sondage par un train de paquets (Packet-Train Probing) [Dovrolis 2001].

Plusieurs techniques actives d'estimation de la BPD et de la capacité d'un chemin de bout-en-bout ont été proposées dans les réseaux filaires et Internet. Un état de l'art détaillé de ces techniques est donné dans [Prasad 2003]. Les implémentations de ces techniques ont données des résultats plus précis que celles des techniques passives. Parmi les premières techniques actives utilisées dans le domaine des réseaux filaires nous citons : VPS (Variable Packet Size), qui a été proposée par [Bellovin 1992] et [Jacobson 1997]. Cette technique mesure des RTT pour estimer la capacité d'un lien en utilisant le champ TTL de l'entête IP et le protocole ICMP [Prasad 2003]. PPTD (Packet Pair/Train Dispersion) proposée par [Jacobson 1988, Keshav 1991] et [Bolot 1993], cette technique est basée sur la dispersion des paquets. PPTD estime la capacité de bout-en-bout entre la source et la destination, en mesurant à la destination le changement de la dispersion entre des paquets de même taille envoyés depuis la source [Dovrolis 2001].

Peu de techniques d'estimation de la BPD sont dédiées aux réseaux Ad Hoc sans fil IEEE 802. Cependant, certaines techniques des réseaux filaires sont utilisées dans les réseaux Ad Hoc sans fil, les plus connues sont : SLoPS (*Self-Loading Periodic Streams*) [Jain 2002a] et TOPP (*Trains of Packet Pairs*) [Melander 2002].

La technique SLoPS estime la BPD d'un chemin de bout en bout entre la source et la destination [Jain 2002a, Jain 2002b]. SLoPS cherche la BPD dans un intervalle initial, en envoyant un train de paquets de sondage de la source vers la destination avec un débit initial. Ce débit est déterminé en utilisant la dispersion entre les paquets de sondage. La destination

supervise les variations des OWDs de chaque train de paquets. Lorsque les valeurs des OWDs montrent une croissance, cela signifie que le train de paquets de sondage a causé la création d'une file d'attente le long du chemin. Par conséquent, la valeur du débit d'envoi de ce train a commencé de dépasser la valeur de la BPD. Cependant, si les valeurs des OWD restent plus ou moins stables, cela signifie que le train des paquets de sondage n'a pas causé la création d'une file d'attente et les paquets ont le même OWD. Ainsi, la valeur du débit de ce train est encore plus petite que la valeur de la BPD. Dans ce cas, SLoPS commence une autre itération en envoyant un nouveau train de paquets de sondage avec un débit égale à la moitié de l'intervalle précédent. A chaque itération l'intervalle de recherche est divisé par deux. Cette méthode de recherche est appelée la recherche *Binaire* ou *Dichotomique*.

La technique TOPP est proposée par Melander et al. [Melander 2000, Melander 2002]. Pour estimer la BPD, TOPP envoie depuis le nœud source vers la destination un train de paires de paquets de sondage de tailles égales. En utilisant la dispersion entre les paquets de sondage le train de paire de paquets sont envoyées avec un débit initial (*Débit d'envoi*). A l'arrivée, le nœud destination calcule le (*Débit de réception*). Lorsque le *Débit de réception* est plus grand que le *Débit d'envoi*, alors les paires de paquets étaient bloquées dans des files d'attente pendant qu'ils traversent le chemin. Dans ce cas, la valeur du *Débit d'envoi* de ce train est plus grande que la valeur de la BPD. Cependant, si le *Débit de réception* est proche de *Débit d'envoi*, alors ce dernier n'a pas encore atteint la valeur de la BPD de chemin. Au cours de processus de sondage, le *Débit d'envoi* des trains augmente d'une façon *linéaire* ou *incrémentale*.

DietTopp [Andreas 2005b], est basée sur la technique TOPP. Le but de DietTopp est d'estimer la BPD dans un environnement sans fil. Le principe de DietTopp est de sonder le réseau avec un débit plus grand que la bande passante théorique du lien. Dans [Frank 2004], les auteurs mettent en relief le fait que le délai des paquets supérieurs à une valeur théorique maximale, permet d'estimer une utilisation du médium et d'en déduire la BPD. Dans [Andreas 2005a], les auteurs étudient l'influence de la taille des paquets sur les estimations. Cette technique n'est pas évaluée avec des scénarios implantés sur un réseau sans fil, mais plutôt sur un réseau hybride (filaire et sans fil). En outre, commencer à sonder le réseau avec un débit plus élevé que la bande passante théorique peut entraîner l'écroulement du réseau.

SLoPS et TOPP utilisent le même principe que PPTD. Cependant les stratégies de sondage et l'analyse des données de ces techniques sont différentes. SLoPS utilise un sondage *binaire* en mesurant les variations des OWDs de bout-en-bout. Tandis que TOPP utilise un sondage *linéaire* en mesurant le débit de réception des paquets. La stratégie *binaire* rend le processus de sondage plus rapide mais fournit un résultat moins précis sous forme d'un intervalle. Toutefois, la stratégie *linéaire* rend le processus de sondage plus lent mais fournit des résultats plus précis.

Dans les techniques actives nous assumons que la charge du réseau reste stationnaire et le chemin de bout-en-bout reste le même pendant le processus d'estimation.

Malheureusement, la plupart des techniques d'estimation actuelles ne prennent pas en considération ces changements. L'inconvénient majeur des techniques actives est l'impact des paquets de sondage sur le *Trafic Concurrent* dans le réseau. Le tableau suivant récapitule les différentes techniques d'estimation de BPD et capacité.

Outil	Auteur	Métrique mesuré	Technique
<i>Pathchar</i> <i>Clink</i> <i>Pchar</i>	<i>Jacobson</i> <i>Downey</i> <i>Mah</i>	<i>La Capacité d'un saut</i>	<i>'Variable packet size'</i>
<i>Bprobe</i> <i>Nettimer</i> <i>Pathrate</i> <i>Sprobe</i>	<i>Carter</i> <i>Lai</i> <i>Dovrolis-Prasad</i> <i>Sariou</i>	<i>La capacité de bout-en-bout</i>	<i>Paire de Paquets</i> <i>Paire de Paquets</i> <i>Paire et Train de Paquets</i> <i>Paire de Paquets</i>
<i>Cprobe</i> <i>Pathload</i> <i>IGI</i> <i>PathChrip</i>	<i>Carter</i> <i>Jian-Dovrolis</i> <i>Hu</i> <i>Riberio</i>	<i>La BPD de bout-en-bout</i>	<i>Train de Paquets</i> <i>'Self-Loading Periodic Streams'</i> <i>'Self-Loading Periodic Streams'</i> <i>'Self-Loading Periodic Streams'</i>

Tableau I.3 : Les techniques d'estimation de la BPD et la capacité [Prasad 2003]

### I.2.3 Contraintes liées à l'estimation de la BPD dans les réseaux Ad Hoc

En général, toutes ces techniques ont certaines contraintes liées à leur application dans les réseaux Ad Hoc réels. Ces contraintes sont les conséquences de la nature complexe des réseaux Ad Hoc ayant des caractéristiques de communication citées dans la section I.1.2.

Ces contraintes concernent le réseau (la mobilité des nœuds, le nombre variable des nœuds dans un réseau, ...), le trafic (la gestion des files d'attente, la fluctuation de la charge du réseau, le modèle du Trafic Concurrent, ...), le délai (la synchronisation des horloges des nœuds,...). D'autres difficultés confrontent les techniques d'estimation, comme l'absence d'une référence de comparaison qui peut être utilisée pour évaluer les résultats obtenue des différentes techniques. Souvent ces contraintes sont accompagnées par des hypothèses pour simplifier la mise en œuvre de ces techniques dans des réseaux Ad Hoc réels. Dans les paragraphes suivants nous détaillerons les principales contraintes rencontrées par la plupart des techniques d'estimation.

#### I.2.3.1 Synchronisation des horloges

Pour calculer les OWDs nous utilisons les instants d'envoi et les instants de réception d'un paquet. Pour que les mesures soient correctes, les horloges des nœuds source et destination doivent être synchronisées.

La synchronisation des horloges dans un réseau est une problématique complexe et constitue à elle seule un vaste domaine d'étude. Les travaux de Paxson [Paxson 1997, Paxson1998] et Jian [Jiang 1999] donne un récapitulatif sur les problèmes habituellement rencontrés lors de la mesure du délai.

En pratique, la synchronisation peut être réalisée par l'emploi de cartes GPS, de modules de réception d'horloge radiofréquence ou encore en se synchronisant sur des serveurs NTP (Network Time Protocol). Les cartes GPS offrent la meilleure précision mais sont très coûteuses et posent des problèmes de réception en intérieur. Il est nécessaire d'installer des antennes extérieures. Les modules de réception radio sont beaucoup moins chers mais n'offrent pas une exactitude comparable. Finalement, la synchronisation sur un réseau de serveurs NTP est la technique la plus utilisée. Elle est capable d'offrir une synchronisation de l'ordre de 10 ms sur l'Internet [Jiang 1999].

Malgré ces moyens mis en œuvre pour la synchronisation les horloges des nœuds, Ces horloges restent non synchronisées à cause des différences de leurs résolutions (le *TIC* ou la précision d'une horloge), en plus de la dérive des horloges l'un par rapport à l'autre qui devienne de plus en plus importante avec le temps.

La synchronisation est nécessaire quand nous utilisons les mesures des OWDs (SLoPS). Cependant, cette synchronisation n'est pas nécessaire si nous utilisons les RTT, parce que les calculs des RTT s'effectuent dans le même nœud (NIMBE).

### **I.2.3.2 Gestion des files d'attente**

Toutes les techniques d'estimation sont basées sur l'hypothèse que la politique de gestion des files d'attente dans le réseau est FIFO (First In First Out). Alors que, dans la réalité les réseaux mettent des applications de gestion des files d'attente en utilisant des politiques qui gèrent les paquets par priorité pour garantir un certain QoS. Cela peut mener à des estimations erronées.

### **I.2.3.3 Modèle du Trafic concurrent**

La charge du réseau dépend du comportement du *Trafic Concurrent*. Ce dernier est le résultat de l'accumulation de plusieurs trafics concurrents de distributions différentes et variables. En plus la durée d'un flux du *Trafic Concurrent* est différente selon la nature d'échange entre la source et la destination. Pour un trafic Web (mesuré en quelques secondes) pour un téléchargement du fichier (mesuré quelques minutes à quelques heures). Dans la simulation la distribution du *Trafic Concurrent* est approximée par des lois de probabilités (Poisson, Pareto, Uniforme, constant...). Dans la réalité, le *Trafic Concurrent* est variable et dépend de l'application source de ce trafic (trafic régulier pour une application audio/vidéo).

Plusieurs tentatives sont faites pour étudier le comportement du *Trafic Concurrent* [Yongmin 2000]. Ces études sont généralement effectuées en utilisant des techniques passives. Le comportement du *Trafic Concurrent* change avec le temps, par le lancement d'une nouvelle application ou par l'entrée et/ou la sortie d'un nœud dans le réseau. Dans notre simulation nous utilisons un *Trafic Concurrent* avec une distribution CBR (Constant Bit Rate) pour simuler le trafic réel qui circule dans le réseau.

### I.2.3.4 Variabilité de la BPD

Une des complications inhérentes à la mesure de la BPD est que la largeur de la BPD change au cours du temps. Cela, est la conséquence de la variation du débit du *Trafic Concurrent* qui induit la variation de la charge du réseau.

L'exemple dans la Figure I.12 montre le résultat d'analyse de débit du *Trafic concurrent* dans deux liens entrant et sortant d'un nœud dans un réseau Internet avec le logiciel MRTG. Les mesures sont effectuées pendant une journée avec une période de 5 minutes entre deux mesures successives. La zone hachurée correspond au débit du *Trafic concurrent* sur le lien sortant, tandis que la ligne correspond au débit du *Trafic concurrent* sur le lien entrant.

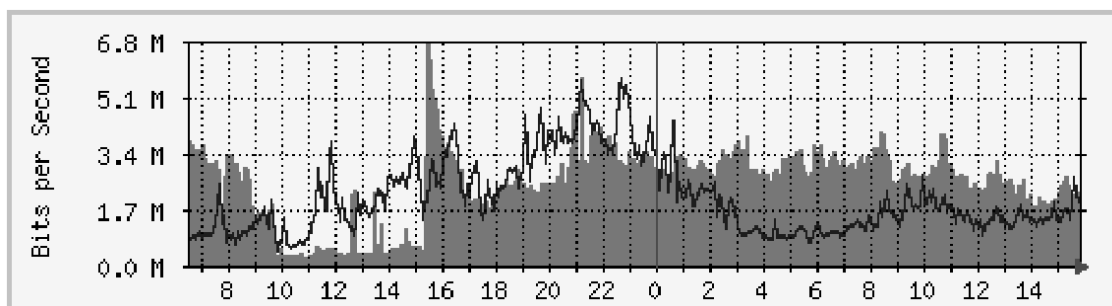


Figure I.12 : MRTG trace d'une journée avec une période de 5 minutes

Nous pouvons estimer la BPD en utilisant l'équation I.5. Nous remarquons le débit du *Trafic Concurrent* est le plus élevé à 15,5. Si nous utilisons une technique d'estimation rapide, à cet instant nous obtenons une petite valeur de la BPD. En revanche si nous utilisons une technique d'estimation lente, elle sonde le réseau pendant une longue période (5 mn), alors nous dépassons le pic de 15,5 et nous obtenons une valeur plus élevée de la BPD. Selon l'application qui utilise l'estimation de la BPD, on doit choisir l'approche la plus adaptée.

### I.2.3.5 Pertes de paquets

Des paquets envoyés par la source peuvent être perdus le long du chemin et ne seront jamais reçus par la destination. Le taux de pertes de paquets est exprimé par le quotient du nombre de paquets non reçus par le nombre total de paquets envoyés. La détection de paquets non reçus par le destinataire peut se faire en utilisant un temps d'expiration (Time-Out) au delà duquel un paquet est considéré perdu. La valeur du temps d'expiration est non définie et dépend des besoins de l'utilisateur [Almes 1999]. En pratique, on pourra détecter les pertes en se basant uniquement sur les numéros de séquence des paquets : un paquet est perdu si plusieurs paquets avec un numéro de séquence supérieur sont arrivés mais pas ce paquet.

Les applications multimédia tolèrent la perte des paquets, mais pas à des seuils trop grande. Si le taux de paquets perdus dépasse un certain seuil (cela dépend du type d'application), il aura des effets significatifs indésirables sur certaines applications temps réel.

(e.g. surveillance médicale d'un patient). Par conséquent, sur la QdS de bout-en-bout, pour un paquet perdu, le OWD est égal à l'infini [Almes 1999].

#### **I.2.3.6 La couche MAC et la dispersion des paquets**

La plupart des couches MAC utilisent FEC (Forward Error Correction) pour recouvrir les paquets perdus. La norme IEEE 802.11 fixe le nombre de retransmission d'un paquet en utilisant l'algorithme Backoff. Ces retransmissions réduisent le nombre de paquets perdus. Cependant, les tentatives de retransmission perturbent la dispersion initiale des paquets de sondage et introduisent des larges variations dans les délais mesurés. À savoir, la dispersion entre les paires de paquet peut être diminuée ou augmentée en traversant les liens sans fil même sans congestion dans le réseau ou sans changements de la capacité du lien.

En outre, la couche MAC le protocole ARF (Auto Rate Fallback) [McGraw 2003] qui utilise l'adaptation dynamique de débit de transmission. L'émetteur adapte sa capacité de transmission selon l'état du lien. Ainsi, l'émetteur tente d'augmenter sa capacité après des transmissions consécutives réussies (ce qui indique une haute qualité du canal de transmission) et retourne à des capacités plus basses après des échecs de transmissions successives. ARF fournit une capacité de transmission correspond à l'état du canal.

Les capacités de transmission sont fixées à l'avance, par exemple la norme IEEE 802.11b fonctionne avec (1, 2, 5.5 et 11 Mb/s) et la norme IEEE 802.11a (6, 12, 18, 24, 36, 48, 54 Mb/s). Cette adaptation dynamique de débit intégrée à la couche MAC perturbe les techniques d'estimation de la BPD, car ces techniques supposent que la capacité est fixe durant le processus d'estimation. Dans notre simulation nous utilisons des nœuds équipés en carte IEEE 802.11b avec un débit fixe de 11Mb/s.

#### **I.2.4 Filtrage Adaptatif des estimations de la BPD**

Malgré des hypothèses utilisées pour pallier aux contraintes citées ci-dessus, ces dernières causent quand même des erreurs d'estimations de la BPD. Ces erreurs sont traduites par des bruits associés à chaque valeur d'estimation de la BPD. Pour résoudre ce problème, et atténuer l'effet de ces contraintes, des méthodes de filtrage sont utilisées pour filtrer les estimations de la BPD [Kim 2001]. La plupart des méthodes de filtrage utilisent les filtres à moyen mobile ou les EWMA (Exponentially Weighted Moving-Average).

Dans la première partie du chapitre IV, nous avons présenté trois types de filtres : le filtre de Stabilité, (Stability Filter), filtre d'Erreurs (Error-Based Filter) et le filtre Flip-Flop, étudiés dans [Kim 2001]. Puis nous avons développé notre propre filtre (*Zone-Filter*). Ce dernier est une amélioration du filtre Flip-Flop en procédant un filtrage adaptatif pendant le processus d'estimation selon le taux du bruit dans l'estimation. *Zone-Filter* est composé de quatre filtres EWMA, en utilisant une méthode statistique appelé CSP (Contrôle Statistique de processus) pour sélectionner le filtre à exécuter pour une estimation donnée.



## I.3 Synthèse

Dans la première partie de ce chapitre nous avons présenté un état de l'art des différentes technologies sans fil. Pareillement, nous avons présenté l'évolution et la mise en œuvre de la norme IEEE 802.11. Nous nous sommes intéressés à l'intégration de la QoS dans les réseaux Ad Hoc sans fil.

La QoS peut regrouper une multitude de concepts distincts. La QoS ne crée pas de bande passante, mais elle permet en revanche d'exploiter au mieux la bande passante existante et de la répartir en fonction des différents besoins. En ce sens, la QoS permet d'éviter un engorgement systématique du réseau. Dans un réseau sans fil Ad Hoc, de nombreux défis doivent être relevés (routage, accès au médium, gestion de mobilité, gestion d'énergie, sécurité, ...). Chacun de ces défis a des effets sur la QoS du réseau.

Dans tout le processus d'intégration du support de la QoS dans les réseaux Ad Hoc (modèles de QoS, signalisation de QoS, routage avec QoS, MAC avec QoS) la connaissance des différents paramètres est nécessaire. Cependant l'estimation de ces paramètres est une tâche ardue. En particulier la bande passante des liens entre les nœuds et surtout dans le cas de protocoles de type CSMA/CA. Ainsi dans notre travail nous considérons la bande passante disponible comme un paramètre principal de la QoS. Nous concentrons notre travail de thèse autour de l'estimation de la bande passante disponible entre deux nœuds sans fil dans un réseau Ad Hoc.

Dans la deuxième partie nous avons présenté les concepts liés à la bande passante (Capacité, OWD, RTT, *Traffic Concurrent*, Bande Passante Disponible). Ainsi, nous avons présenté l'état de l'art des différentes techniques d'estimations de la BPD. Ainsi nous distinguons deux types de techniques : les techniques passives, et les techniques actives. Les techniques passives se contentent d'observer le trafic qui circule dans le réseau pour estimer la BPD. L'avantage de ces techniques est qu'elles ne perturbent pas le trafic du réseau (non intrusive). Cependant, les résultats de ces techniques sont imprécis. D'autre part, les techniques actives injectent un trafic supplémentaire pour sonder le réseau et estimer la BPD. Les résultats de ces techniques sont précis, mais leur grand inconvénient est qu'elles sont intrusives, à cause de leur trafic de sondage nécessaire à l'estimation de la BPD.

A la fin de ce chapitre, nous avons présenté les contraintes d'application de ces techniques dans des réseaux Ad Hoc réels, comme (la synchronisation des horloges des nœuds, la gestion des files d'attente, le modèle de *Traffic Concurrent*, ...).

Dans le chapitre suivant nous avons comparé l'estimation de la BPD et la Capacité d'un lien dans les réseaux Ethernet et sans fil. Nous avons utilisé les techniques d'estimations actives basées sur la dispersion des paquets TOPP et SLoPS. Les scénarios de simulation sont implémentés sous NS-2 et les résultats sont analysés par MATLAB.



# Chapitre II

## Estimation de bande passante disponible : Techniques basées sur la dispersion des paquets

### Sommaire

---

#### II.1 Techniques d'estimations basées sur la dispersion des paquets

II.1.1 Principe de Base

II.1.2 La technique "Packet Pair/Train Dispersion" (PPTD)

II.1.3 La technique "Trains Of Packet Paires" (TOPP)

II.1.4 La technique "Self-Loading Periodic Streams" (SLoPS)

#### II.2 Estimation de la Bande Passante Disponible et la Capacité du lien

II.2.1 Environnement de la Simulation

II.2.2 Effets de la taille des paquets sur les estimations

II.2.3 Effets du débit du *Trafic concurrent* sur les estimations

II.2.4 Evaluation des estimations dans les réseaux Ethernet et sans fil

II.2.5 Critiques et Limites des techniques TOPP et SLoPS

#### II.3 Synthèse

---

## II.1 Techniques d'estimations basées sur la dispersion des paquets

Dans ce chapitre, nous axons notre travail sur l'estimation de la BPD (Bande Passante Disponible) et de la Capacité d'un lien en utilisant les techniques basées sur le concept dit de « dispersion des paquets » dont la technique de base est le PPTD (Packet Pair/Train Dispersion). Cette technique a été initialement développée pour estimer la Capacité d'un chemin de bout-en-bout dans un réseau filaire sans la présence d'aucun autre trafic (sans *Trafic concurrent*). SLoPS (Self Loading Periodic Stream) et TOPP (Train Of Packet Pair) sont l'extension et la généralisation de cette technique pour estimer la BPD et la Capacité d'un chemin de bout-en-bout en présence de *Trafic concurrent*.

Dans ce chapitre nous allons décrire le principe de fonctionnement de PPTD. Puis nous présenterons en détail les techniques SLoPS et TOPP. Des simulations dans l'environnement NS-2 (Network Simulator Version 2) seront utilisées pour évaluer l'influence de la variation de la taille des paquets de sondage et la variation des débits du *Trafic concurrent* sur l'estimation de la BPD et de la Capacité. Ces simulations seront faites sur des réseaux LAN Ethernet et sans fil d'IEEE 802.11. Le but est d'évaluer et de comparer les effets de la variation de la taille des paquets et du débit du *Trafic concurrent* sur l'estimation de la BPD et la Capacité du lien dans ces deux topologies. Les résultats de simulation seront comparés en mettant en évidence certains points importants concernant l'estimation dans l'environnement filaire et sans fil. A la fin de ce chapitre, certaines critiques de TOPP et SLoPS du point de vue synchronisation, précision et temps de convergence seront présentés. Des conclusions et un bilan seront décrits à la fin de ce chapitre.

### II.1.1 Principe de Base

La BPD et la Capacité (en Mb/s) d'un chemin de bout en bout peuvent être mesurées par les techniques basées sur la dispersion de paquets (paires ou train de paquets). Ces techniques reposent sur le phénomène "d'écartement" ou de "dispersion" subi par deux paquets consécutifs suite à leur passage dans le *Goulet d'étranglement* "Bottleneck Link" du chemin de bout-en-bout : l'espace temporel qui les séparent est accru (phénomène mis en évidence par Jacobson [Jacobson 1988]). Cette dispersion correspond au temps de traitement du premier paquet au niveau du *Goulet d'étranglement*, (Figure II.1).

Pour estimer la BPD, les techniques combinent le concept de la dispersion des paquets avec le concept d'*Auto-Congestion* du chemin de bout en bout. Ce dernier consiste à injecter du trafic dans le réseau jusqu'à saturer le lien de *Goulet d'étranglement* afin d'en extraire ses caractéristiques. La source envoie vers la destination des flux de paquets de sondage avec une dispersion qui correspond à un certain débit d'envoi. Si le débit d'envoi est inférieur à la BPD, alors les paquets de sondage présenteront des délais stables à la destination. En revanche, si le débit est supérieur à BPD alors les flux de paquets de sondage présenteront des délais croissants. Donc, l'*Auto-Congestion* consiste à envoyer des flux de paquets de sondage vers

une destination à des débits différents. Cette dernière détecte le débit à partir duquel les délais commencent à augmenter. Ce débit est égal à la bande passante disponible [Strauss 2003].

Dans ce qui suit, nous supposons que pendant le processus d'estimation, la charge de trafic sur ce chemin reste stable. Les changements dans la charge de trafic des liens peuvent créer des erreurs dans les valeurs d'estimation. Malheureusement, la plupart des techniques actuellement disponibles ne prennent pas en compte ce paramètre durant le processus d'estimation.

### II.1.2 La technique ‘‘Packet Pair/Train Dispersion’’(PPTD)

‘‘Packet Paire/Train Dispersion’’ ou PPTD [Lai 1999] est la première technique active d'estimation de la capacité d'un chemin. Elle constitue le principe de fonctionnement fondamental des techniques basées sur la dispersion des paquets. Cette technique est composée de deux stratégies principales de sondages. La première utilise une paire de paquets pour estimer la Capacité d'un chemin de bout-en-bout. Tandis que la deuxième utilise un train de paquets pour estimer la BPD. Ces deux stratégies de sondages sont détaillées dans les paragraphes suivants.

#### II.1.2.1 Le sondage par Paire de Paquets

La technique PPTD utilise la définition de la capacité d'un chemin présenté dans le premier chapitre (section I.2.1). D'après l'équation (I.4) du premier chapitre, la capacité d'un chemin est égale la plus petite capacité d'un lien dans le chemin. Nous définissons le *Goulet d'étranglement* comme le lien qui a la plus petite capacité dans le chemin de bout-en-bout. Par conséquence, pour mesurer la capacité du chemin, il suffit de mesurer la capacité du *Goulet d'étranglement*.

Le sondage par paire de paquets consiste à injecter dans le réseau une paire de paquets pour sonder le chemin de bout-en-bout. La paire est constituée de deux paquets de même taille, envoyés depuis la source, S vers la destination, D. Avant l'émission, la source enregistre les instants d'envoi de ces paquets. La dispersion entre les deux paquets : est le temps qui sépare le premier bit de chaque paquet. Cette dispersion est recalculée de la même façon à la réception par la destination en supposant qu'aucun autre trafic ne traverse ce chemin (i.e., pas de *Trafic concurrent*). La dispersion entre les paquets n'est pas la même à la réception qu'à l'émission. Ceci est dû au *Goulet d'étranglement* de chemin de bout-en-bout [Lai 1999]. La Figure II.1 montre la dispersion d'une paire de paquets avant et après qu'elle traverse un *Goulet d'étranglement* d'une Capacité  $C_g$ .

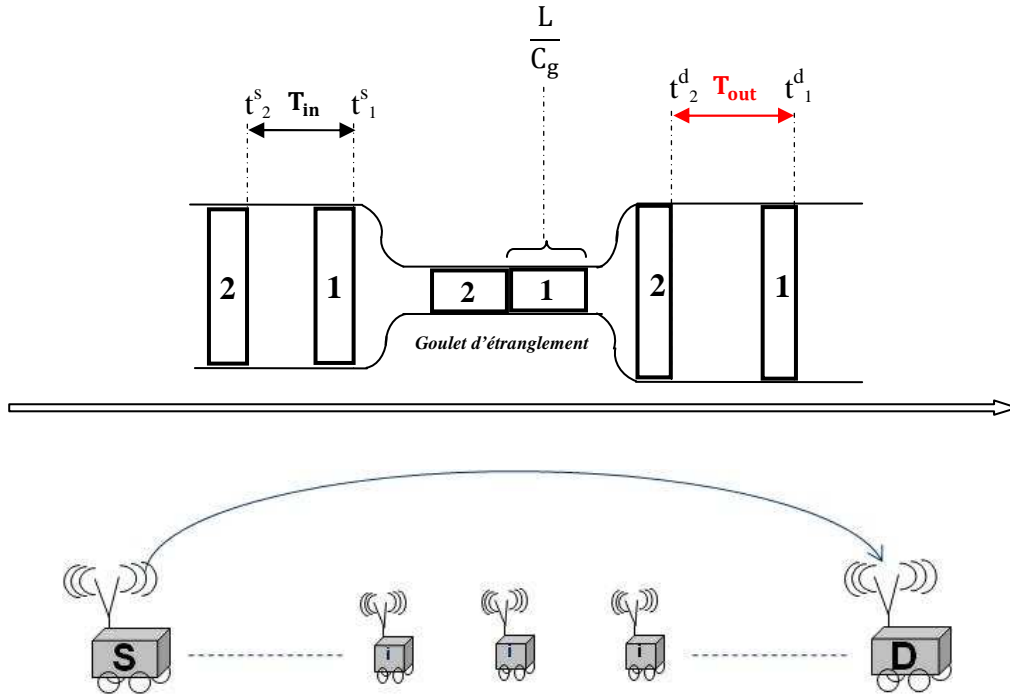


Figure II.1 : Principe de la dispersion de paquets

Avec  $(t_2^s, t_1^s)$  et  $(t_2^d, t_1^d)$  sont respectivement les instants d'envoi et de réception du premier et du deuxième paquet. Les paquets 1 et 2 ont la même taille  $L$ . D'après la définition de la Capacité du premier chapitre (section I.2.1.C), la Capacité du chemin de bout-en-bout entre la source et la destination correspond à la Capacité du *Goulet d'étranglement*. C'est-à-dire :

$$C_g = C = \min(C_1, \dots, C_h) \quad (\text{II. 1})$$

Soit  $h$  le nombre de liens ou de sauts dans un chemin de bout-en-bout.  $T_{in}$  est la dispersion d'émission qui sépare les deux paquets (1 et 2). Cette dispersion doit être minimale pour garantir l'hypothèse que les deux paquets se succèdent dans la même file d'attente dans le *Goulet d'étranglement*. D'autres hypothèses posées pour que cette formulation soit réaliste, nous citons les suivantes [Lai 2000] : Nous supposons que les files d'attente sont gérées par la politique FIFO (First In First Out), aussi nous supposons qu'il n'y a pas de *Trafic concurrent* dans le réseau.

Deux paquets ont la même taille signifiée que ces deux paquets ont la même vitesse (Vitesse). Si la taille du paquet (1) est plus petite que celle du paquet (2), la dispersion entre les deux paquets va s'élargir. Si c'est le contraire la dispersion entre les deux paquets va se rétrécir. Avec la gestion FIFO de la file d'attente, le deuxième paquet ne dépassera jamais le premier.

La dispersion de réception, notée  $T_{out}$ , est le temps inter-arrivée des deux paquets à la destination, D. En absence de *Trafic concurrent* dans le réseau, la dispersion entre les deux paquets est donnée par l'équation suivante :

$$T_{out} = \text{Max} (t_2^0 - t_1^0, \dots, \frac{L}{C_g}, \dots, t_2^i - t_1^i, \dots, t_2^h - t_1^h) \quad (\text{II.2})$$

Ainsi :

$$T_{out} = \text{Max}_{i=0, \dots, h} \left( \frac{L}{C_i} \right) = \frac{L}{\text{Min}_{i=0, \dots, h} (C_i)} = \frac{L}{C_g} \quad (\text{II.3})$$

D'où la Capacité du chemin :

$$C = C_g = \frac{L}{T_{out}} \quad (\text{II.4})$$

Des techniques d'estimation mettent en œuvre ce principe de différentes manières. Par exemple,

Bprobe [Carter 1996] mesure les RTT, par l'envoi des paquets de sondage en forçant la destination d'envoyer une certaine forme de message d'erreur en réponse à chaque paquet de sondage. Par exemple, en initialisant le TTL "Time To Live" du paquet de sondage avec le nombre de saut, la destination renvoie un paquet ICMP Port-inaccessible. L'avantage est que l'estimation est effectuée par la source tout en évitant de mettre en place une autre application côté destination. Par contre, l'hypothèse que les paquets de sondages et les paquets d'erreurs empruntent le même chemin à l'aller et au retour est critiquable, car les chemins dans un réseau (filaire ou sans fil) sont généralement asymétriques.

L'inconvénient majeur du sondage par paire de paquets est qu'il ne prend pas en considération l'interaction entre les paquets de sondage et les paquets de *Trafic concurrent*. L'hypothèse que le chemin est vide de tout autre trafic est loin d'être réaliste (les nœuds échangent au moins les paquets de contrôle, "Beacon", ...). En outre, le *Trafic concurrent* peut augmenter ou diminuer la dispersion, ce qui provoque une sous-estimation ou surestimation de la Capacité du chemin.

Pour palier à ce problème, d'autres techniques (SLoPS, TOPP) étendent le concept de dispersion de paquets en utilisant un train de paquets de sondage. Ce type de sondage qui tolère l'existence de *Trafic concurrent* est utilisé pour estimer la BPD. Prasad [Prasad 2003] détaille les limites de cette dispersion.

### II.1.2.2 Le sondage par Train de Paquets

Au lieu d'envoyer deux paquets, avec le sondage par Train de Paquets la source envoie à la destination un flux de paquets de sondage avec une dispersion entre chaque paire de paquets. Cette dispersion détermine le débit de l'envoi en prenant en considération le *Trafic concurrent* ; cette stratégie de sondage utilise l'Auto-Congestion pour estimer la BPD d'un

lien.

En supposant que dans un intervalle de temps donné le débit de *Trafic concurrent*  $R_c$  est constant, alors la BPD peut être obtenue comme suit :

$$BPD = C - R_c \quad (II.5)$$

Où  $C$  est la Capacité du chemin de bout-en-bout. Comme le montre la Figure II.2, lorsque le débit d'entrée  $R_{in}$  est plus grand que la BPD ( $R_{in} > BPD$ ), le chemin va être surchargé. On appelle  $R_{ovr}$  le débit de surcharge du chemin de bout-en-bout. Ce débit est exprimé comme suit :

$$R_{ovr} = R_{in} - BPD \quad (II.6)$$

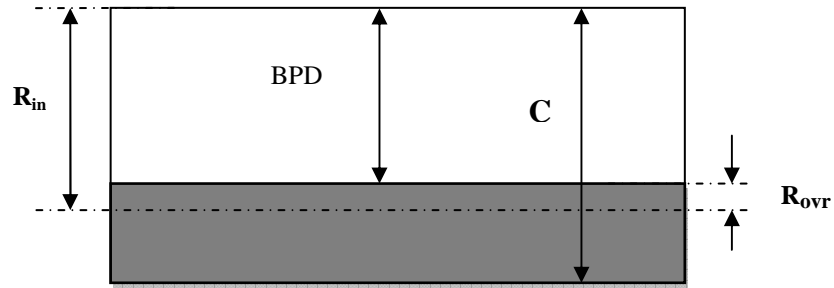


Figure II.2: Le concept d'Auto-Congestion. Le chemin entre la source et la destination est surchargé ( $R_{in} > BPD$ ).

Le débit de surcharge  $R_{ovr}$  sera proportionnel à la quantité d'information que le lien ne peut pas traiter. Rappelons que les paquets de sondage sont de même taille. Cette taille est fixe et égale à  $L$ .  $T_{in}$  est la dispersion d'émission entre deux paquets de chaque paire, ce paramètre détermine le débit d'envoi  $R_{in}$  de chaque paire de paquets.

$$T_{in} = \frac{L}{R_{in}} \quad (II.7)$$

$$Data_{ovr} = R_{ovr} * T_{in} \quad (II.8)$$

Pendant cette période, la quantité de données  $Data_{ovr}$  ne sera pas traitée. Cela se traduit par une mise en file d'attente des paquets, et provoque un délai de retard  $T_q$ .

$$T_q = \frac{R_{ovr} * T_{in}}{C} = \frac{L}{C} * \left( \frac{R_{in} - BPD}{R_{in}} \right) \quad Si \ R_{in} > BPD \quad (II.7)$$

Sinon, si  $R_{in} < BPD$  alors :



Le débit de réception,  $R_{out}$  est exprimé à l'aide de la dispersion de réception comme suit :

$$R_{out} = \frac{L}{T_{out}} = \frac{L}{T_{in} + T_q} = \frac{R_{in} C}{C + R_{in} - BPD} \quad (II.8)$$

Quand le débit de réception commence à devenir plus grand que celui d'envoi,  $R_{out} \cong R_{in}$  l'équation II.8 devient :

$$\frac{R_{out}}{R_{in}} = \frac{C}{C + R_{in} - BPD} = 1 \quad (II.9)$$

Alors :

$$C = C + R_{in} - BPD \quad (II.10)$$

Ainsi :

$$BPD = R_{in} \quad (II.11)$$

D'où la BPD est égale au débit d'envoi quand le débit de réception commence à dépasser celui d'envoi. Autrement dit, quand les paquets de sondage commencent à faire des retards dans files d'attente et le chemin commence à être saturé. Dans ce cas, les dispersions des paquets de sondage deviennent de plus en plus importantes et les débits de réceptions aussi.

Nous admettons toujours l'hypothèse que les files d'attente des routeurs sont gérées selon la politique FIFO (First In First Out), et que la charge du réseau est stable pendant le processus d'estimation. De plus le protocole de routage ne change pas le chemin entre la source et la destination pendant le processus d'estimation. Certaines implémentations de la dispersion des paquets utilisent des méthodes statistiques comme la médiane et le mode, pour filtrer les estimations erronées de la BPD et la Capacité [Dovrolis 2001].

Au lieu d'utiliser la dispersion, d'autres techniques [Hu 2003] [Pasztor 2002] utilisent les variations des dispersions (les giges). Cette catégorie de techniques est appelée "Probe Gap Model" ou PGM. Peu d'études ont été effectuées sur l'évaluation des avantages et des inconvénients de ces méthodes.

Dans notre travail nous étudions deux techniques parmi les plus connues. Ces techniques utilisent la dispersion de paquets dans sa forme étendue. SLoPS estime la BPD en utilisant une méthode de sondage binaire (recherche dichotomique de la BPD), en divisant par deux l'intervalle de recherche de la BPD à chaque itération. Cependant, TOPP estime la BPD et la Capacité en utilisant une méthode de sondage linéaire, en incrémentant le débit de sondage à chaque itération.

### II.1.3 La technique "Trains Of Packet Paires" (TOPP)

L'objectif de cette section est de décrire comment mettre en œuvre la technique TOPP pour estimer la BPD et la Capacité du chemin de bout-en-bout. Proposée par Melander et al [Melander 2000], [Melander 2002], TOPP envoie un train de paires de paquets avec un débit initial faible  $R_{in}$  (i.e. une grande dispersion) et augmente progressivement le débit d'émission de la source vers la destination. Cette technique est considérée comme l'extension de PPTD. Pour cette raison, TOPP et PPTD partagent les mêmes hypothèses, avantages et inconvénients.

Le principe de TOPP est le suivant : quand le débit  $R_{in}$  est supérieur à la bande passante disponible, alors le débit  $R_{out}$  mesuré au niveau de la destination sera inférieur à  $R_{in}$  (le débit de sortie du *Goulet d'étranglement* est inférieur au débit d'entrée) à cause de la congestion causée par les paires de paquets elles mêmes. L'idée consiste donc à envoyer un train de paires de paquets avec un débit minimal  $R_{in} = R_{min}$  et d'incrémenter ce dernier à chaque nouvel envoi jusqu'à l'obtention de  $R_{in} \geq R_{out}$ . C'est à ce moment que le débit  $R_{in}$  correspond à la BPD de bout-en-bout. Pour illustrer en détail le fonctionnement de cette technique, nous allons décrire l'algorithme de TOPP.

#### II.1.3.1 Algorithme de la technique TOPP

Comme indiqué ci-dessus, l'idée de base de la technique TOPP est très simple, sa principale complexité réside dans la détection du *point de déviation* du segment linéaire (Figure II.4). L'algorithme TOPP est divisé en deux phases distinctes. La première est la *phase de sondage* où toutes les paires de paquets sont injectées dans le réseau (au niveau du nœud source). La deuxième est la *phase d'analyse des données*, où l'estimation de la BPD mesurée en utilisant le rapport de débit d'envoi et de réception (au niveau du nœud destination). Ces deux phases sont décrites dans les sections suivantes.

##### a) La phase de sondage

L'outil TOPP (Train Of Paquet Pairs) [Melander 2000] utilise la même approche que Paires Paquets. Cependant, comme son nom l'indique, TOPP utilise un train de paires de paquets au lieu d'une simple paire de paquets. Chaque paire est composée de deux paquets de même taille  $L$  séparée initialement d'une dispersion  $T_{in}$ . Le débit d'envoi du train est ainsi égal à  $R_{in} = L/T_{in}$ . Pendant la phase de sondage, TOPP tente d'estimer la BPD dans un intervalle fixe  $[R_{min} ; R_{max}]$ . Elle envoie  $M$  trains de paires de paquets par itération. Un train contient  $K/2$  paires de paquets. Bien que [Melander 2000] décrit que TOPP envoie seulement un train par itération, l'envoi de  $M > 1$  trains pourrait conduire à une estimation plus précise en faisant la moyenne des résultats. TOPP commence à envoyer le train de paires de paquets avec un débit minimal  $R_{in}^0 = R_{min}$  ; puis à chaque itération, TOPP augmente le débit d'envoi avec  $\Delta R$ , (équation II.12).

Dans notre simulation nous avons choisi  $K=10$  paquets par train et  $M=2$  trains par flux. Nous avons fait ce choix pour éviter la surcharge du réseau dans les cas extrêmes lorsque nous envoyons des paquets de taille trop grande (1500 octets et 2200 octets). Aussi, le choix de  $M=2$ , puisque nous estimons que  $M=1$  est insuffisant et  $M=10$  [Jain 2002b] affecte et dégrade le trafic réseau (Trafic Concurrent). Nous choisissons  $R_{\min} = 1$  Mb/s.  $R_{\max}$  dépend du type de réseau ( $R_{\max} = 10$  Mb/s pour Ethernet  $R_{\max} = 11$  Mb/s pour IEEE 802.11). Pour  $\Delta R$  nous choisissons la valeur 100 Kb/s. L'algorithme TOPP utilise une recherche *Linéaire* de la BPD. La Figure II.3 résume cette phase.

$$R_{in}^{i+1} = R_{in}^i + \Delta R \quad (II.12)$$

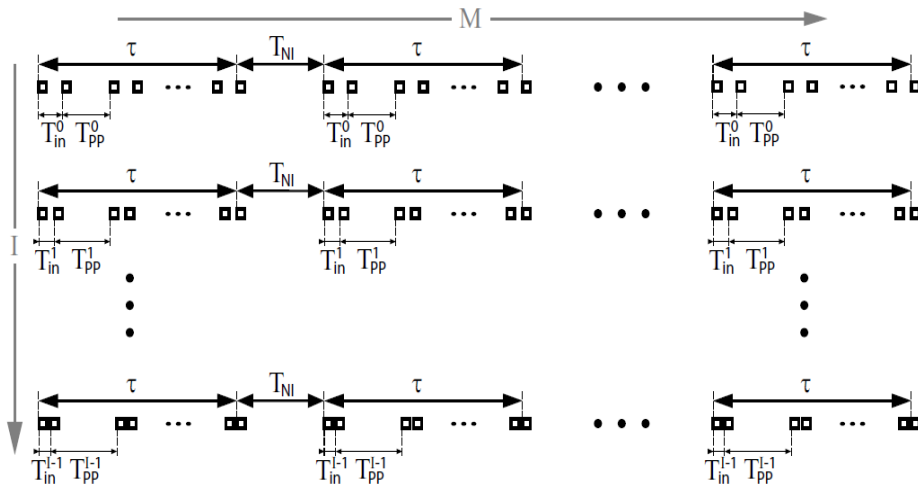


Figure II.3 : La phase de sondage dans la technique TOPP

$T_{pp}$  représente le temps qui sépare deux paires de paquets, il devrait être aussi large que possible afin d'éviter l'influence d'une paire de paquets sur la paire suivante [Villa 2006].  $\tau$  est la durée d'un train de paire de paquets, il doit être fixe pour que les trains des paires de paquets ont la même durée. Egalement pour simplifier la modélisation de la durée de sondage que nous allons étudier dans le chapitre II. Dans notre simulation, nous avons choisi  $\tau = 120$ ms, pour maintenir  $\tau$  inchangé nous adaptons  $T_{pp}$  à chaque nouveau débit d'envoi. Ainsi la durée d'un train de paires de paquets  $\tau$  est donnée par :

$$\tau = T_{in} * \frac{K}{2} + T_{pp} * \left( \frac{K}{2} - 1 \right) \quad (II.13)$$

$I$  est le nombre total d'itérations de la phase de sondage.  $T_{NI}$  est un écart temporel entre les trains de paires de paquets. Cet écart est inséré pour éviter la surcharge du réseau et pour maintenir la non-corrélation entre les résultats des différents trains, en évitant leur interférence. Il doit être  $T_{NI} \geq \tau$ , dans notre simulation nous avons choisi  $T_{NI} = 120$ ms.

Une fois que tous les  $M$  trains ont été reçus, la destination analyse toutes les dispersions de réception  $T_{out}^i$ .

Les valeurs du reste des paramètres ( $R_{in}$ ,  $L$ ,  $T_{in}$ ), ainsi que ceux de la simulation sont définis dans la section II.2.1.4 selon le scénario de la simulation et selon le réseau que nous utilisons (Ethernet ou sans fil).

### b) Phase d'analyse des données

La totalité de la phase de traitement et d'analyse des données dans la technique TOPP est effectuée par la destination ; cette phase peut être résumée en trois points.

- i. La moyenne de  $K/2$  dispersions de réception appartenant à chaque train est calculé pour avoir une seule dispersion par train ( $T_{out}^i$ ). Puis le débit de réception est calculé à l'aide de l'équation (II.14) :

$$R_{out}^i = L/T_{out}^i \quad (II.14)$$

La moyenne des  $M$  débits de réception est calculée pour obtenir une seule valeur par itération  $i$ .

$$R_{out}^i = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M R_{out}^j \quad (II.15)$$

Avec la même démarche que dans la section (II.1.2) et par substitution de l'équation (II.5) dans l'équation (II.8), le rapport entre  $R_{in}$  et  $R_{out}$  s'exprime comme suit :

$$\frac{R_{in}}{R_{out}} = \frac{R_{in}+R_c}{C} = \frac{1}{C} R_{in} + \frac{R_c}{C} \quad (II.16)$$

En supposant que dans un intervalle de temps donné le débit du *Traffic concurrent*  $R_c$  est constant, alors la BPD peut être obtenue comme suit :

- ii. L'équation (II.16) est utilisée pour obtenir la courbe (Figure II.4). qui représente l'évolution du  $\frac{R_{in}}{R_{out}}$  par rapport à  $R_{in}$ . Cette courbe nous permet d'estimer la BPD et la Capacité du lien.
- iii. Enfin, la valeur de la BPD correspond à la valeur  $R_{in}^i$  la plus proche du *point de déviation* de la courbe (lorsque  $R_{in}^i \gtrsim R_{out}^i$ , Figure II.4). En outre, la pente de la courbe correspond à  $\frac{1}{C}$ . Par conséquent TOPP peut aussi calculer la Capacité du lien.

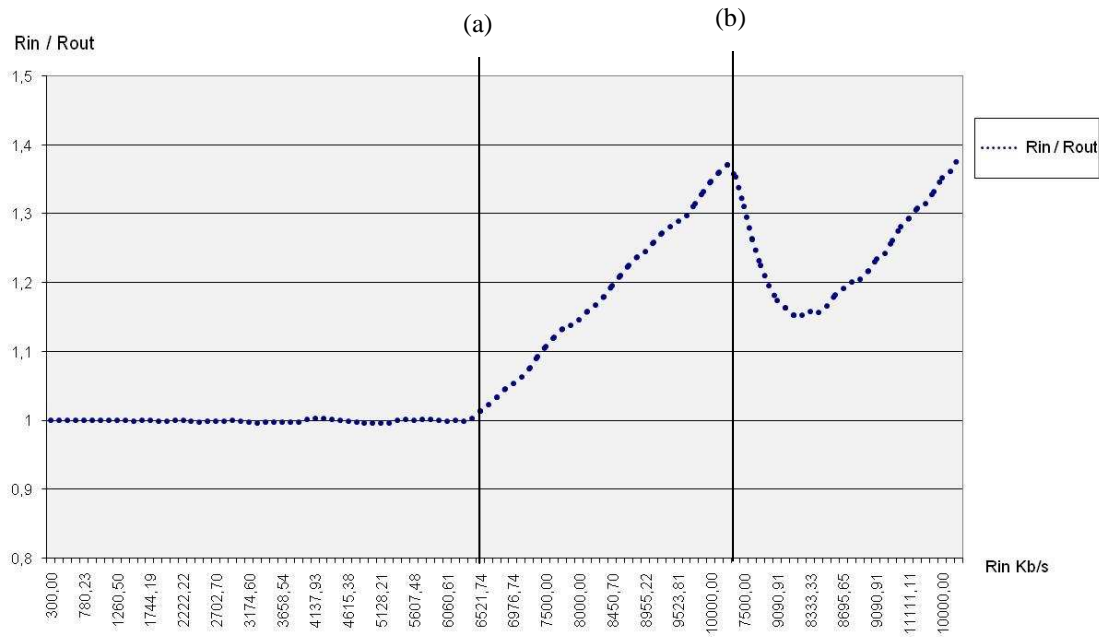


Figure II.4 : Exemple de l'estimation de la BPD avec la technique TOPP, pour un réseau Ethernet de 10 Mb/s.

(a) : La BPD est de 6521,74 Kb/s ~ 6,5 Mb/s

(b) : Lorsque  $R_{in}$  dépasse ~10 Mb/s les paquets commence à se perdre

## II.1.4 La technique "Self-Loading Periodic Streams" (SLoPS)

SLoPS est une technique récente basée sur la dispersion des paquets. Proposée par [Jain 2002a] pour mesurer la BPD d'un chemin de bout-en-bout. Périodiquement la source envoie un train de paquets de même taille à la destination "Periodic Packet Stream". Ces trains sont envoyés à des débits différents. La destination calcule les OWDs "One Way Delay" des paquets de chaque train, puis analyse leurs variations.

Dans SLoPS, la source tente de rapprocher le débit du train à celui de la BPD, en utilisant une recherche binaire de la BPD. Tandis que la destination informe la source sur l'évolution des OWDs de chaque train. Le résultat est un intervalle Min et Max des valeurs d'estimations de la BPD. Pour comprendre le fonctionnement de SLoPS, nous détaillerons son algorithme dans la section suivante.

### II.1.4.1 Algorithme de la technique SLoPS

Le fonctionnement de la technique SLoPS constitue une succession d'alternance entre la phase de sondage : en envoyant un train de paquets par la source, et la phase d'analyse : en évaluant les variations des OWDs par la destination. Les phases de sondage et d'analyse ainsi que les modèles mathématiques sont détaillés dans cette section.

### a) La phase de sondage

Pour mesurer la BPD, la source envoie périodiquement  $M$  trains de paquets de sondage à la destination ( $M=2$ ). Chaque train de sondage est constitué de  $K$  paquets. Tous les paquets ont la même taille ( $L$  bits). La dispersion entre deux paquets adjacents dans le train est  $T_{in}$  (Figure II.5). Ce dernier détermine le débit d'envoi du train de sondage ( $R_{in} = L/T_{in}$ ).

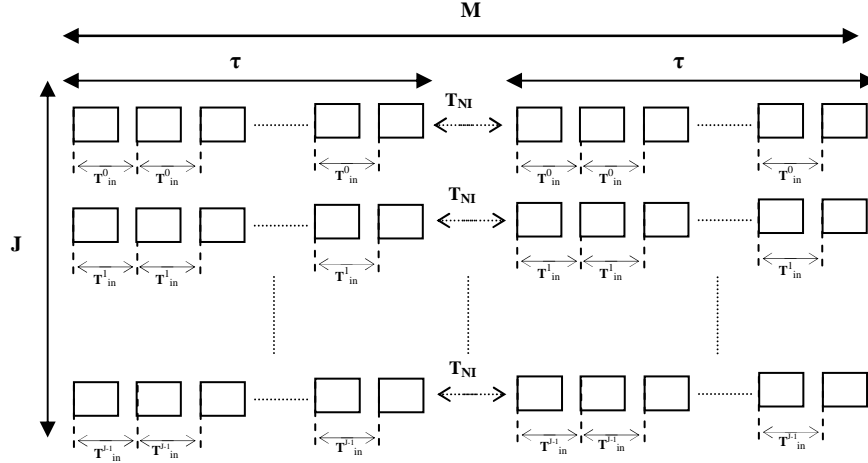


Figure II.5. La phase de sondage de la technique SLoPS,  $J$  est le nombre total d'itération

La durée de chaque train est choisie de la même valeur que celle de TOPP ( $\tau = 120ms$ ). L'intérêt d'avoir la même durée de train est d'offrir les mêmes conditions statistiques pour TOPP et SLoPS pour pouvoir les comparées. Tous les deux trains, un délai  $T_{IN}$  est inséré pour atténuer l'intrusion de flux sur le trafic du réseau. En général,  $T_{IN}$  évite la surcharge du réseau et permet au *Traffic Concurrent* de se stabiliser après le passage du train de paquets précédant ( $T_{IN} = 120ms$ ).  $J$  est le nombre d'itération de la phase de sondage. Pour changer le débit d'envoi  $R_{in}$  et maintenir  $\tau$  inchangé, nous adaptons le nombre de paquets  $K$  à envoyer pour à chaque itération.

Avant leur transmission, les instants d'envoi sont enregistrés par la source dans un champ *Time\_Snd* du paquet de sondage. A la réception de chaque paquet les instants d'arrivés des paquets sont aussi enregistrés dans le champ *Time\_Rcv* par la destination. Donc la destination pourra calculer les OWDs de chaque paquet.

SLoPS mesure les variations des OWDs afin de pouvoir évaluer les variations des délais passés dans les files d'attente par les paquets de sondages pendant leurs traversées du chemin de bout-en-bout.

Nous reprenons la définition de OWD de l'équation (I.5) du chapitre I :

$$OWD_k = \sum_{i=1}^h (x_i + d_i + q_k^i) = \sum_{i=1}^h \left( \frac{L_k}{C_i} + d_i + q_k^i \right) \quad (II.17)$$

$$(OWD_k - OWD_{k+1}) = \sum_{i=1}^h \left( \frac{L_k}{C_i} + d_i + q_k^i \right) - \sum_{i=1}^h \left( \frac{L_{k+1}}{C_i} + d_i + q_{k+1}^i \right) \quad (II.18)$$

$L_k = L_{k+1}$  et  $d_i$  est le délai de propagation (constante) :

$$(OWD_k - OWD_{k+1}) = \sum_{i=1}^h (q_k^i - q_{k+1}^i) \quad (\text{II.19})$$

Tel que  $OWD_k$  est le OWD du  $K^{\text{ième}}$  paquet,  $h$  est le nombre de sauts,  $x_i$  est le temps de transmission du  $i^{\text{ème}}$  saut,  $C_i$  est la capacité du  $i^{\text{ème}}$  saut. Ainsi, comme le montre l'équation (II.19), nous pouvons déduire que si et seulement si les OWDs de deux paquets consécutifs de même taille augmentent (diminuent), leurs délais d'attente dans la file augmentent (diminuent) aussi, [Villa 2006].

$$OWD_{k+1} \geq OWD_k \Leftrightarrow q_{k+1} \geq q_k \quad (\text{II.20})$$

La détection des variations des OWDs est faite par groupe de paquets. La technique SLoPS commence la recherche binaire de la BPD par un intervalle initiale  $[R_{\min}^0 ; R_{\max}^0]$ . À chaque nouvelle itération le débit  $R_{\text{in}}$  prend comme valeur la moitié de cet intervalle. C'est-à-dire qu'à chaque itération l'intervalle de recherche est divisé par deux.

$$R_{\text{in}}^0 = (R_{\max}^0 + R_{\min}^0)/2 \quad (\text{II.22})$$

Tel que  $R_{\min}^0 = 1 \text{ Mb/s}$  et  $R_{\max}^0$  est égale à 11Mbits/s pour IEEE 802.11 et 10 Mb/s pour Ethernet. Leurs valeurs peuvent être différentes d'une implémentation à une autre. Dans SLoPS, la source doit attendre le résultat d'analyse des variations des OWDs de la destination.

## b) La phase d'analyse

Dans la phase d'analyse SLoPS teste la croissance des  $K$  OWDs d'un train de paquets. Pour détecter une telle croissance, SLoPS divise les valeurs des  $K$  OWDs en  $P$  groupes, tel que  $P = \sqrt{K}$ . Le teste en groupe rend la détection de la croissance des OWDs plus robuste. Ainsi, la moyenne de chaque groupe est calculée :

$$\{ \widehat{OWD}_j^i \text{ tel que } j = 1, \dots, P \}$$

Tel que  $\widehat{OWD}_j^i$  est la moyenne du groupe  $j$  des OWDs appartenant au train  $i$ . SLoPS analyse les groupes des OWDs de chaque train, en utilisant deux paramètres statistiques complémentaires. Le teste de comparaison par paire de groupe de OWDs ou le *PCT* (*Pairwise Comparison Test*), utilisé pour détecter la croissance des OWDs. Ainsi, le  $PCT^i$  d'un train  $i$  est défini comme suit :

$$PCT^i = \frac{\sum_{j=1}^P CRSS(\widehat{OWD}_j^i > \widehat{OWD}_{j-1}^i)}{P-1} \quad (\text{II.23})$$

$$\text{Tel que } \begin{cases} \text{CRSS}(x) = 1 \text{ si } x \text{ est vrai} \\ \text{CRSS}(x) = 0 \text{ si non} \end{cases}$$

$PCT^i$  mesure la fraction des paires des OWDs consécutifs. Donc  $0 \leq PCT^i \leq 1$ .

Si les OWDs sont indépendants alors le  $PCT^i = 0,5$ . En revanche s'il existe une croissance forte des OWDs, alors le  $PCT^i$  se rapproche de 1.

Le deuxième paramètre est le teste de différence par paire de groupe de OWDs ou le *PDTou (Pairwise Different Test)*. Le *PDT* mesure la robustesse des variations des OWDs. Ainsi, le  $PDT^i$  d'un train  $i$  est défini comme suit :

$$PDT^i = \frac{(\overline{OWD}_p^i - \overline{OWD}_1^i)}{\sum_{j=2}^P |\overline{OWD}_j^i - \overline{OWD}_{j-1}^i|} \quad (\text{II.24})$$

Si les OWDs sont indépendants  $PDT^i = 0$  et s'il existe une forte croissance des OWDs  $PDT^i = 1$ . Notons que  $-1 \leq PDT^i \leq 1$ .

En utilisant PCT et PDT nous tombons dans des cas où l'un des deux est meilleur pour détecter la croissance des OWDs. Par conséquence, si le PCT ou le PDT montre une croissance des OWDs, alors SLoPS considère que les OWDs de ce train comme croissant ( $R_{in}^i > BDP$ ), si non le train est considéré comme non croissant ( $R_{in}^i < BDP$ )

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Si } R_{in}^i > BPD \text{ Alors } R_{max} = R_{in}^i \\ \text{Sinon } R_{min} = R_{in}^i \\ R_{in} = \frac{(R_{min} + R_{max})}{2} \\ \text{Si } (R_{max} - R_{min}) \leq \theta, \text{ Arrêt de sondage} \end{array} \right. \quad (\text{II.25})$$

Tel que  $\theta$  est la résolution désirée, elle est attribuée par l'administrateur et dépend de plusieurs paramètres comme la précision désirée, le type de l'application qui utilise l'estimateur de la BPD et le type de réseau. SLoPS surveille l'évolution des variations des OWDs des paquets de sondage de chaque train. Si le débit d'envoi  $R_{in}^i$  de train de paquets est plus grand que la BPD, le train provoque une surcharge à court terme dans la file d'attente du *Goulet d'étranglement* du chemin de bout-en-bout. Au cours de cette période de surcharge le *Goulet d'étranglement* reçoit plus de trafic que ce qu'il peut transmettre, ce qui cause l'augmentation de la taille de sa file d'attente. Ainsi, quand  $R_{in}^i > BPD$ , les valeurs des OWDs des paquets de sondage qui sont misent en file d'attente augmentent. D'autre part, si le débit  $R_{in}^i < BPD$ , les paquets de sondage vont passés par le chemin sans provoquer une surcharge dans le *Goulet d'étranglement*. Par conséquence, les valeurs des OWDs de ces paquets n'augmentent pas. La Figure II.6 illustre ces deux cas.



A chaque train envoyé par la source, la destination doit répondre en retournant le résultat de l'évolution des OWDs. La source utilise ce résultat pour adapter le débit d'envoi du prochain train de paquets.

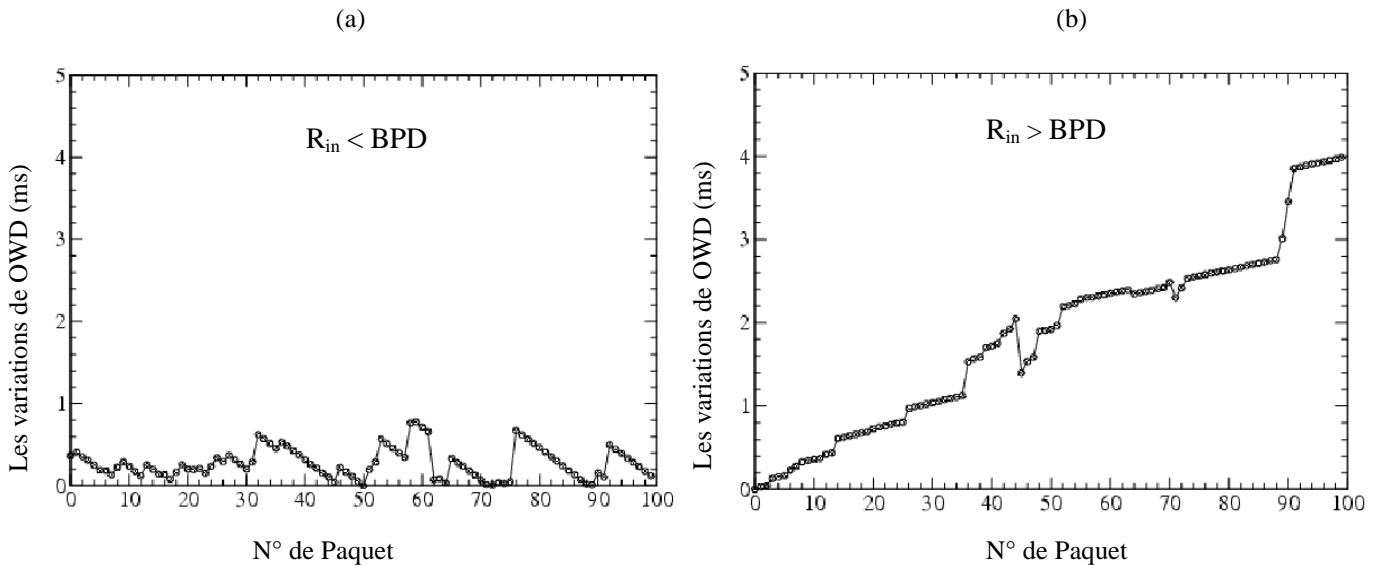


Figure II.6 : L'évolution des OWDs des paquets du train [Jain 2002b]  
 (a) OWDs quasi stables quand le débit du train est plus faible que la BPD  
 (b) OWDs augmentent quand le débit du train est plus grand que la BPD

## II.2 Estimation de la Bande Passante Disponible et la Capacité du lien

Avant que nous soyons en mesure d'introduire une amélioration sur une technique existante ou de proposer une nouvelle technique d'estimation. Nous avons décidé d'étudier les estimations de la BPD et de la Capacité aussi bien dans les réseaux Ethernet que dans les réseaux sans fil en implémentant les techniques TOPP et SLoPS. Ensuite, nous comparons les résultats d'estimations de la BPD obtenus. En tirant les conclusions qui s'imposent. Dans cette section, nous étudions les propriétés des réseaux Ethernet (basés sur la norme de l'IEEE 802.3) et les réseaux sans fil (basés sur la norme de l'IEEE 802.11). Dans notre simulation nous utilisons différentes tailles des paquets de sondage et différents débits du *Trafic concurrent*.

Notre étude peut être résumée en trois points :

- 1- L'effet de la variation de la taille des paquets et la variation du débit de *Trafic concurrent* sur l'estimation de la BPD et la capacité.
- 2- La comparaison de l'estimation de la BPD et la Capacité dans les réseaux filaire et sans fil
- 3- La comparaison des comportements des deux techniques SLoPS et TOPP pendant le processus d'estimation.

## II.2.1 Environnement de la Simulation

Dans cette section nous avons développé des simulations dans l'environnement NS-2 "Network Simulator-2", les résultats sont analysés en utilisant MATLAB-10 "Matrix Laboratory-10". Les scénarios de simulation ont pour objectif d'étudier les différents paramètres liés à l'estimation de la BPD et de la Capacité du lien. Pour effectuer des évaluations fiables et valides, nous avons utilisé deux topologies similaires (Ethernet Figure II.7 et sans fil Figure II.6) avec les mêmes scénarios. TOPP et SLoPS sont utilisées dans l'estimation de la BPD et la capacité du lien. Dans chaque réseau, deux nœuds génèrent un *Trafic concurrent* à débit constant. Deux autres nœuds sondent le réseau pour tenter d'estimer la BPD et la Capacité en échangeant un trafic de sondage.

### II.2.1.1 Topologies des réseaux

Pour pouvoir comparer efficacement les résultats finaux, nous avons essayé d'avoir une similitude entre les topologies des réseaux Ethernet et sans fil. Le réseau Ethernet comme le montre la Figure II.7, est composé de quatre nœuds équipés d'une carte réseau Ethernet, 10 Mbits/s. Le *Trafic concurrent* est transporté par le chemin  $1 \leftrightarrow X - Y \leftrightarrow 4$ . Le trafic de sondage est transporté par le chemin  $2 \leftarrow X - Y \rightarrow 3$ . Notons que les paquets des deux trafics ont un lien commun  $X \leftrightarrow Y$ . La Capacité théorique de ce lien est 10 Mbits/s. Dans notre simulation, nous estimons la Capacité réelle et la BPD de ce lien.

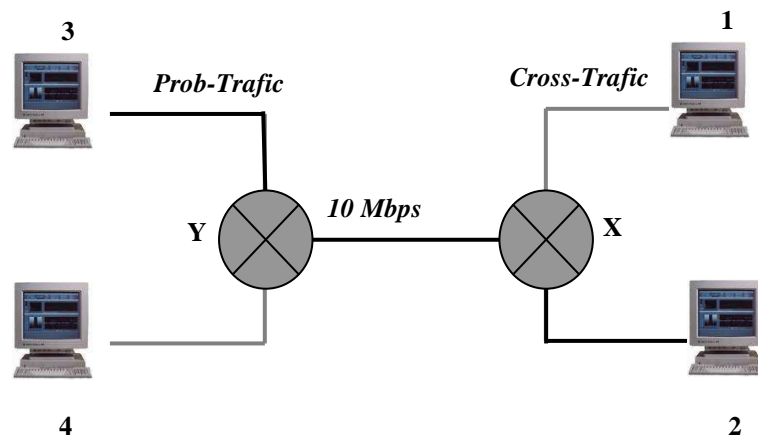


Figure II.7 : Topologie du réseau Ethernet : Trafic de sondage 2-X-Y-3, *Trafic concurrent* 1-X-Y-4

En ce qui concerne le réseau sans fil (Figure II.8), nous utilisons le même nombre de nœuds (4 nœuds). Chaque nœud est équipé d'une carte réseau sans fil IEEE 802.11b, 11Mbits/s (11 Mbits/s est la Capacité théorique brut). La raison pour laquelle nous avons choisi ce type de carte avec ce débit, est qu'il est proche du débit Ethernet de 10 Mbits/s.

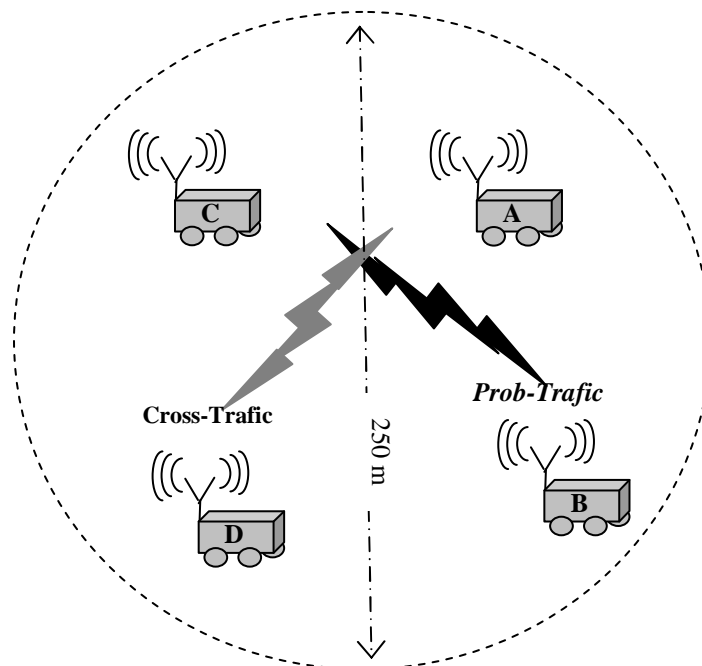


Figure II.8 : Topologie du réseau Sans fil : Trafic de sondage B-C, *Trafic concurrent* A-D

Les paquets de *Trafic Concurrent* sont envoyés depuis le nœud **A** vers le nœud **B**. En outre, les nœuds **C** et **D** essaient de sonder le réseau pour estimer la BPD et la Capacité réelle du lien, en envoyant des paquets de sondage. Les nœuds sont positionnés dans un diamètre qui ne dépasse pas **250 m**. Chacun des nœuds est dans la portée de transmission des autres nœuds. Cela signifie que le lien est commun entre les quatre nœuds, d'où les paquets de *Trafic concurrent* et les paquets de trafic de sondage partagent le même lien.

### II.2.1.2 La Taille des paquets de sondage

La MTU "Maximum Transfer Unit" [McGraw 2003], représente la taille maximum du paquet à transporter par le médium sans être fragmenté. La fragmentation est effectuée au niveau de la couche MAC, par le protocole IEEE 802.3 dans le réseau Ethernet et par le protocole IEEE 802.11 dans le réseau sans fil. Le MTU d'un réseau Ethernet IEEE 802.3 est égal de 1518 octets (dont 1500 octets comme charge utile). Les paquets qui ont une taille supérieure à 1518 octets sont fragmentés avant d'être transporté sur le médium filaire. De même, le MTU du réseau sans fil IEEE 802,11 est égal à 2346 octets, (dont 2312 octets comme charge utile).

Contrairement aux travaux précédents [Melander 2000], [Andreas 2005b] dans notre simulation le MTU de chaque type de réseau est pris en compte pour éviter toute opération de

fragmentation au niveau de la couche MAC. Car cette fragmentation introduit des erreurs dans le processus d'estimation. Parce que, si nous ne respectons pas le MTU de chaque type de réseau, cela signifie que l'envoi d'un paquet au niveau de la couche IP peut engendrer l'envoi d'un ou plusieurs paquets au niveau de la couche MAC.

Pour éviter l'effet des entêtes de la couche IP les paquets doivent être de taille supérieure à 200 octets [Prasad 2003]. Ainsi, nous choisissons la taille minimale du paquet de sondage égale 256 octets. Par conséquent les tailles des paquets utilisées dans la simulation varient entre (256 octets et MTU).

Les paquets utilisés dans la simulation ont le format suivant :

Packt_Type	Seq	Time_Send	Time_Rcv	Data_Field
------------	-----	-----------	----------	------------

Figure II.9 : Format du paquet échangé entre la source et la destination

Tel que :

- Packt\_Type : est le type du paquet : 'S', pour paquet de sondage, 'B', pour le paquet qui contient la valeur de la BPD calculé au niveau de la destination.
- Seq: est le numéro de la séquence.
- Time\_Send / Time\_Rcv : l'instant d'envoi et l'instant de réception
- Data\_Field : ce champ est utilisé pour compléter la taille du paquet, il contient des '0'.

### II.2.1.3 Modèles de *Trafic concurrent*

Plusieurs modèles de *Trafic concurrent* existent dans la littérature. La plupart de ces modèles utilisent les lois les plus connues de la statistique (Poisson, Normal...). L'objectif de ces modèles est d'imiter au maximum le trafic réel dans le réseau. Mais c'est loin d'être réaliste vue la variabilité de la charge du réseau. Dans tous les scénarios de la simulation nous utilisons un *Trafic concurrent* de type CBR (Constant Bit Rate). Le débit de ce type de *Trafic concurrent* reste constant durant tout le processus d'estimation. Cependant, différents débits de *Trafic concurrent* (0, 2, 3 et 4 Mb/s) sont utilisés dans la simulation afin d'évaluer l'effet de changement de débit du *Trafic concurrent* sur l'estimation de la BPD et la Capacité.

### II.2.1.4 Scénarios de la simulation

Le principe de la simulation est le suivant : deux nœuds dans chaque réseau ( $1 \leftarrow \rightarrow 4$ , pour Ethernet et  $A \leftarrow \rightarrow D$ , pour le sans fil) échangent un *Trafic concurrent* avec un débit constant et les deux autres nœuds ( $2 \rightarrow 3$ , pour Ethernet et  $B \leftarrow \rightarrow C$ , pour le sans fil) sondent le réseau pour estimer la BPD et la Capacité du lien. Deux types de scénarios sont mis en œuvre.

Le premier : nous fixons le débit du *Trafic concurrent* et nous changeons la taille des paquets de sondage. Le deuxième : la taille des paquets de sondage est fixe et nous changeons le débit de *Trafic concurrent*. Ces scénarios sont appliqués sur les deux réseaux (Ethernet et sans fil).

- *Les paramètres de TOPP :*

Paramètres	IEEE 802.3	IEEE 802.11
$R_{\max}$	10 Mb/s	11 Mb/s
$R_{\min}$	1 Mb/s	
K	10	
M	2	
$\Delta R$	100 Kb/s	
$\tau$	120 ms	
$T_{NI}$	120ms	

Tableau II.1 : Paramètres de la technique TOPP

Le  $T_{in}$  et le  $T_{pp}$  sont variables et dépendent de la taille du paquet et du  $R_{in}$  de chaque itération, par exemple :

Pour  $L = 1500$  octets et si  $R_{in} = 2$  Mb/s alors à partir de l'équation (II.7)  $T_{in} = 12$  ms. Puis nous appliquons l'équation (II.13) nous trouvons  $T_{pp} = 15$  ms. Nous remarquons que le  $T_{pp} \geq T_{in}$ , cette condition est vérifiable pendant toute la phase du sondage.

- *Les paramètres de SLoPS :*

Paramètres	IEEE 802.3	IEEE 802.11
$R_{\max}$	10 Mb/s	11 Mb/s
$R_{\min}$	1 Mb/s	
M	2	
$\theta$	100 Kb/s	
$\tau$	120 ms	
$T_{NI}$	120ms	

Tableau II.2 : Paramètres de la technique SLoPS.

- Les paramètres de la simulation :

Paramètres	IEEE 802.3	IEEE 802.11
L	256, 512, 1024, 1500 octets	256, 512, 1024, 2200 octets
L (fixe)	1500 octets	
Trafic Concurrent	0, 2, 3, 4 Mb/s	
Trafic Concurrent (fixe)	2 Mb/s	

Tableau II.3 : Paramètres de la simulation.

Les instants d'envoi et de réception des paquets permettent au nœud destination de calculer les OWDs. Ces paramètres sont enregistrés dans un fichier texte pour être traités et analysés par MATLAB. Les résultats obtenus seront illustrés par des graphiques et expliqués en détail dans les sections suivantes.

**a) Scénarios avec des paquets de sondage à taille variable**

Pour ces scénarios le débit du *Trafic concurrent* est fixé à 2 Mbits/s et la taille des paquets de sondage est variable. Le nœud source (le nœud 2 pour Ethernet et le nœud B pour le sans fil) envoie au nœud destination (le nœud 3 pour Ethernet et le nœud C pour le sans fil) un train de  $M=2$  paquets. Les tailles de paquet utilisées dans les scénarios de simulation sont : 256, 512, 1024 et 1500 octets pour le réseau Ethernet et le 256, 512, 1024, 1500 et 2200 octets pour le réseau sans fil. Les techniques TOPP et SLoPS sont utilisées pour estimer la BPD du lien. En plus de la BPD, la Capacité du lien est estimée par TOPP.

**b) Scénarios avec un *Trafic concurrent* à débit variable**

Dans cette catégorie de scénarios la taille des paquets de sondage est fixe et égale à 1500 octets. Nous avons choisi cette valeur puisqu'elle représente le MTU de la norme IEEE 802.3 et peut être supportée par la norme IEEE 802.11. Quant au *Trafic concurrent*, nous utilisons plusieurs débits en commençant par un débit nul (0 Mbits/s) pour estimer la Capacité réelle du lien sans aucune perturbation. En outre, nous avons mis en œuvres d'autres scénarios en changeant le débit avec les valeurs suivantes : 2, 3 et 4 Mbits/s pour faire des estimations en présence de différentes charges du réseau.

## II.2.2 Effets de la taille des paquets sur les estimations

Dans cette section nous montrerons l'effet de la variation de la taille des paquets sur les estimations de la BPD et la Capacité du lien pour les deux médiums filaire et sans fil. Nous présentons les résultats des techniques TOPP et SLoPS.

### – La technique TOPP

La Figure II.10 et la Figure II.11 représentent les mesures effectuées respectivement dans les deux médiums d'accès filaire et sans fil, en utilisant la technique TOPP.

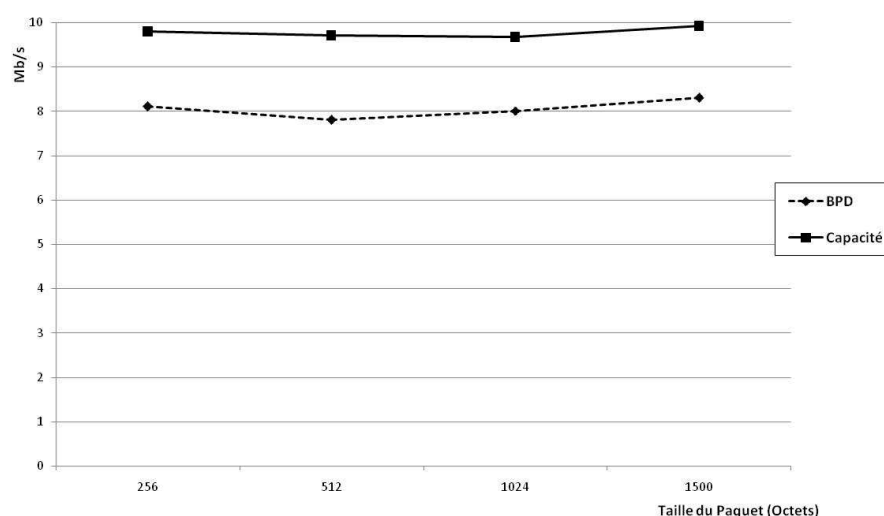


Figure II.10 : Ethernet, en variant la taille des paquets, les estimations de la BPD et la Capacité du lien sont quasi stables

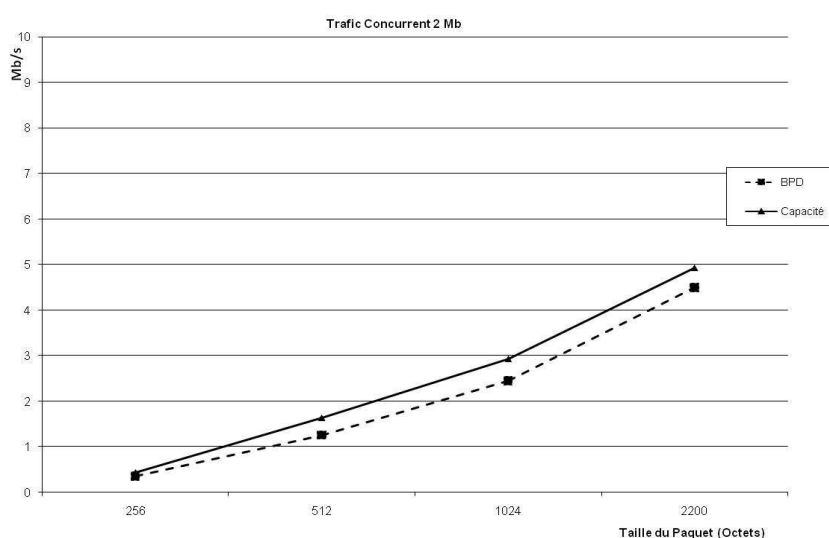


Figure II.11 : IEEE 802.11, la BPD et la Capacité du lien sont affectées par la variation de la taille des paquets.

Les valeurs en Mbits/s de la BPD et la Capacité du lien sont représentées en fonction de la taille des paquets de sondage. Les valeurs de la BPD sont représentées par les courbes en lignes discontinues et celles de la Capacité par des courbes en lignes continues. A partir de ces deux graphes, nous pouvons noter deux points importants :

- Le premier est que dans le cas du réseau Ethernet, les valeurs estimées de la BPD et de la Capacité du lien sont stables lorsque la taille des paquets de sondage varie. En revanche, dans le cas du réseau sans fil, les valeurs de la BPD et de la Capacité du lien augmentent avec la taille des paquets. Cela signifie que les valeurs estimées de la BPD et de la Capacité du lien sont indépendantes de la taille des paquets dans les réseaux Ethernet, mais elles sont dépendantes de la taille des paquets dans le cas des réseaux sans fil.
- Le deuxième point est que, dans le cas du réseau Ethernet les valeurs de la Capacité du lien se stabilisent autour de 9,3 Mbits/s et les valeurs de la BPD autour de 8,1 Mbits/s, ce qui est cohérent avec la définition (équation II.5). Sachant que le débit du *Trafic concurrent* est de 2 Mbits/s. Cependant, dans le cas du réseau sans fil, la BPD et la Capacité atteignent leurs valeurs maximales quand la taille des paquets est égale au MTU (soit 2200 octets). La valeur maximale de la Capacité est de 4,9 Mbits/s. Cette valeur est très loin de la valeur théorique de 11 Mbits/s. Les explications de ces deux points seront détaillées dans la section (II.2.4).

#### – La technique SLoPS

Comme nous l'avons indiqué au début de ce chapitre, la technique SLoPS ne peut estimer que la BPD, et ses résultats sont sous forme d'intervalles. La Figure II.12 et la Figure II.13 représentent les estimations de la BPD en fonction des tailles des paquets.

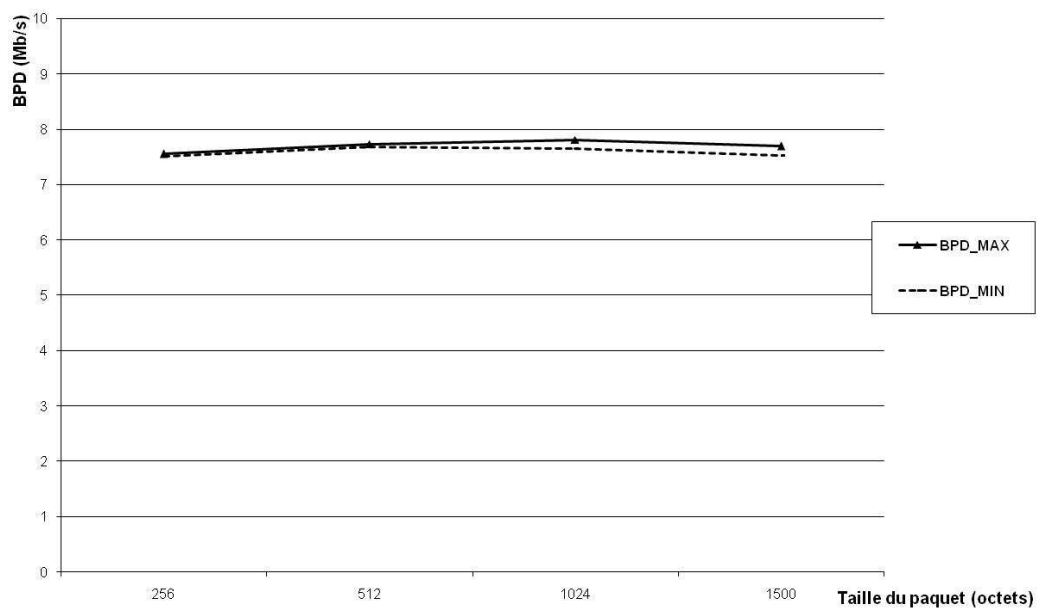


Figure II.12 : Ethernet, L'évolution de la BPD en fonction de la taille des paquets. Le débit du *Trafic concurrent* est 2Mb/s.



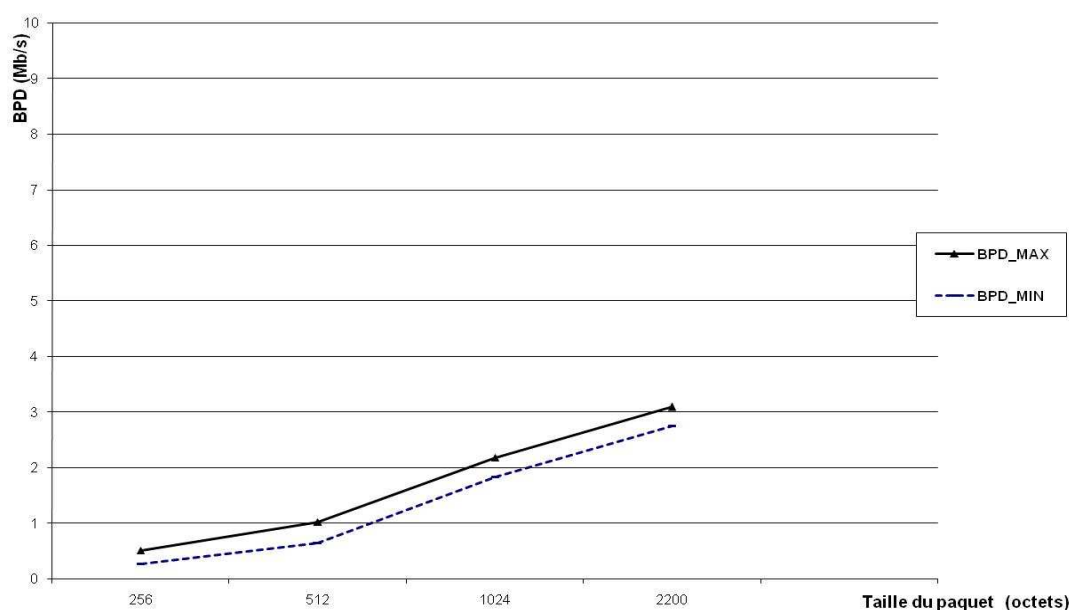


Figure II.13 : IEEE 802.11, L'évolution de la BPD en fonction de la taille des paquets. Le débit du *Trafic concurrent* est 2Mb/s.

Les valeurs Maximales de la BPD sont en lignes continues et les valeurs Minimales sont en ligne discontinues.

Les deux courbes dans la Figure II.12 montrent les valeurs estimées de la BPD dans le cas du réseau Ethernet. Les deux courbes se stabilisent autour des valeurs Min=7,51 Mbits/s et Max=7,70 Mbits/s. C'est moins précis que la technique TOPP dans le réseau Ethernet (Tableau II.5). Dans la Figure II.13, les deux courbes montrent que l'augmentation de la taille des paquets dans le réseau sans fil mène à une augmentation des valeurs de la BPD estimées. Les valeurs maximales de la BPD ([2,85 Mbits/s - 3,9 Mbits/s]) correspondent à la MTU des paquets sans fil. D'après l'équation II.5, ces valeurs restent très loin des valeurs théoriques (11 Mbits/s) et la bande passante consommée par le *Trafic concurrent* (2 Mbits/s).

Non seulement la BPD dépend de la variation de la taille des paquets dans le réseau sans fil, mais aussi, les estimations de la BPD sont beaucoup moins précises dans les réseaux sans fil que dans le réseau Ethernet (Tableau II.5). Nous expliquerons en détail les causes dans la section (II.2.4).

### II.2.3 Effets du débit du *Trafic concurrent* sur les estimations

Cette section mettra l'accent sur les effets de la variation de débit du *Trafic concurrent* sur l'estimation de la BPD et la Capacité du lien dans les réseaux : Ethernet et sans fil. La taille des paquets est fixe (1500 octets), mais le débit de *Trafic concurrent* prend comme valeurs (0, 2, 3 et 4 Mbits/s).

### – La technique TOPP

Les résultats illustrés dans la Figure II.14 et la Figure II.15 montrent l'évolution des estimations de la BPD et la Capacité du lien en fonction de débit du *Traffic concurrent*.

Ces mesures sont effectuées dans les deux réseaux : Ethernet et sans fil en utilisant la technique TOPP. Les estimations de la BPD sont représentées par les courbes en lignes discontinues, les lignes continues représentent les estimations de la Capacité du lien.

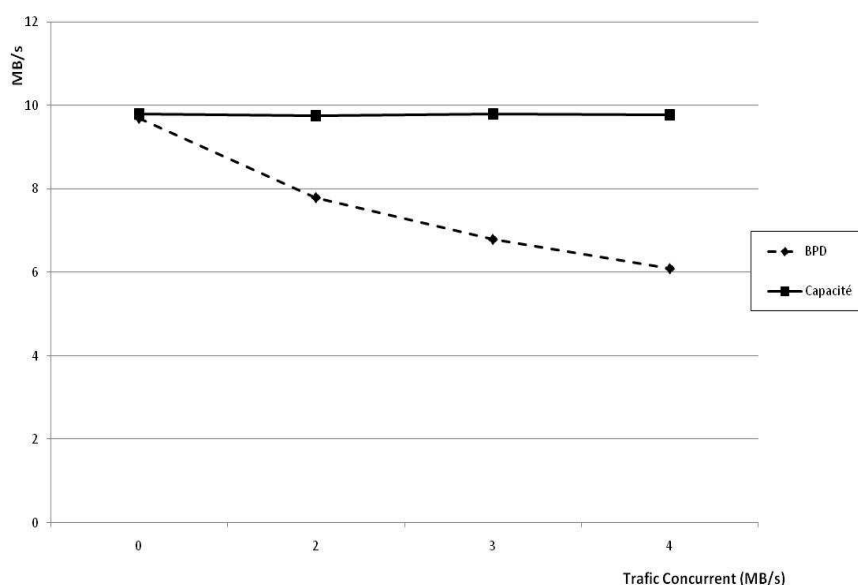


Figure II.14 : Ethernet, seulement la BPD est affectée par la variation de débit du *Traffic Concurrent*, les valeurs de le Capacité du lien restent stables.

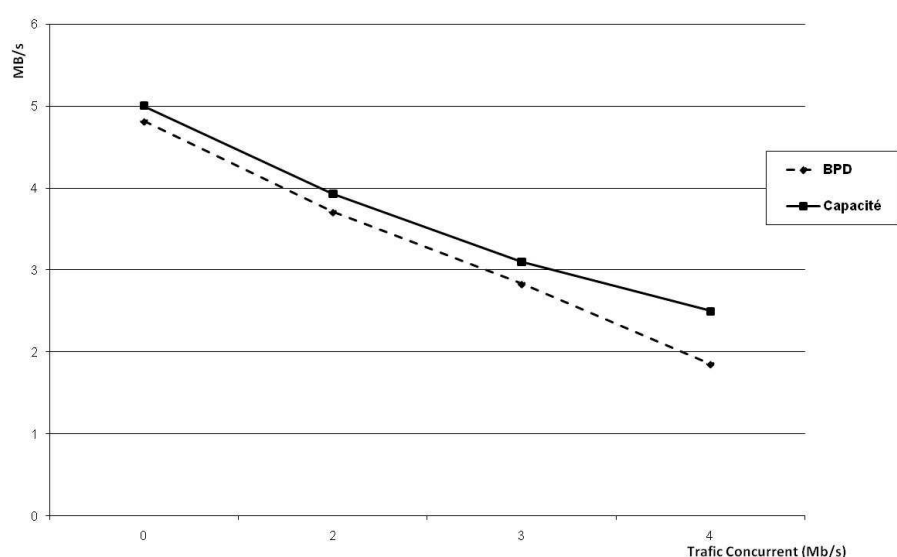


Figure II.15 : IEEE 802.11, les valeurs de la BPD et la Capacité sont affectées par la variation de débit du *Traffic Concurrent*.

En ce qui concerne les résultats du réseau Ethernet représentés par la Figure II.14, nous observons que quelque soit les valeurs du débit de *Trafic concurrent*, les mesures de la Capacité du lien restent stables. Cependant, une croissance du débit de *Trafic concurrent* entraîne une décroissance des valeurs de la BPD estimées. Cela signifie que la Capacité est indépendante de la variation de débit du *Trafic concurrent*. En revanche la BPD est inversement proportionnelle au débit du *Trafic concurrent*.

Quant au réseau sans fil, les courbes de la Figure II.15 montrent qu'une croissance de débit du *Trafic concurrent* de 0 Mbits/s à 4 Mbits/s provoque une décroissance des valeurs d'estimation de la BPD et la Capacité. Nous pouvons également observer que la valeur maximale de la Capacité réelle est d'environ de 5,03 Mbits/s. Par conséquent, nous pouvons en déduire que la Capacité réelle dans le réseau sans fil, non seulement elle représente environ ~ 50 % de la Capacité théorique, mais dépend aussi de la variation du débit du *Trafic concurrent*.

#### – La technique SLoPS

La Figure II.16 illustre les résultats de la simulation en utilisant la technique SLoPS. Les deux courbes supérieures représentent les résultats du réseau Ethernet et celles inférieures du réseau sans fil. Les courbes en lignes continues représentent des valeurs maximales de la BPD et les courbes en lignes discontinues représentent les valeurs minimales de la BPD. Nous pouvons observer sur ces courbes que la croissance du débit du *Trafic concurrent* entraîne une décroissance des valeurs de la BPD. Cela est complètement conforme avec la définition de la BPD. En outre l'intervalle d'estimation du réseau Ethernet reste plus petit que celui du réseau sans fil.

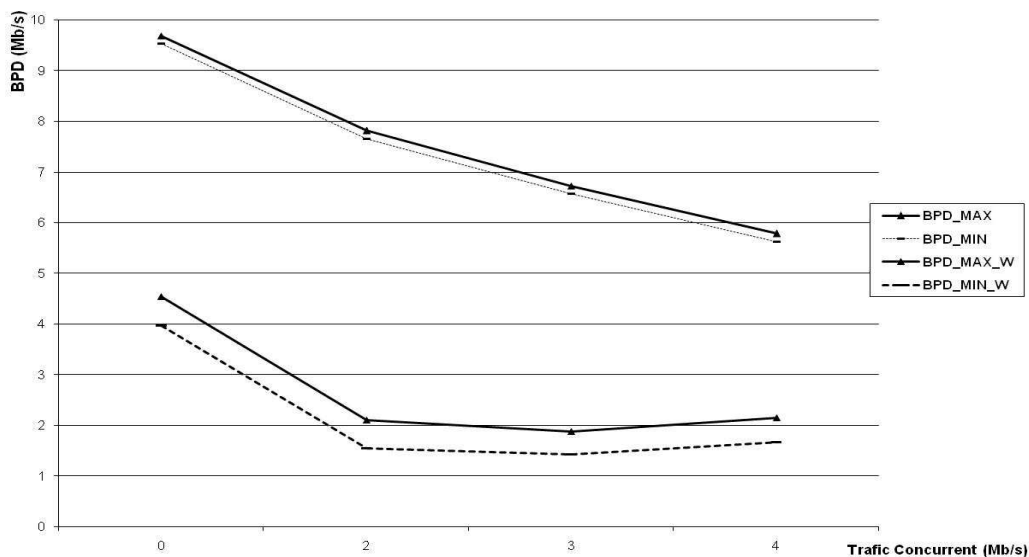


Figure II.16 : La BPD en fonction de débit *Trafic concurrent*

- Les courbes supérieures représentent les résultats du réseau Ethernet
- Les courbes inférieures représentent les résultats du réseau IEEE 802.11b

## II.2.4 Evaluation des estimations dans les réseaux Ethernet et sans fil

Dans cette section, nous discutons les résultats obtenus dans les sections précédentes, en mettant l'accent sur les différentes caractéristiques des réseaux : Ethernet et sans fil. Pour comprendre certains phénomènes, nous détaillons les différences entre le protocole IEEE 802.3 et le protocole IEEE 802.11

### - *Le Protocol IEEE 802.3*

Le format d'un paquet Ethernet du protocole IEEE 802.3 est présenté par la Figure II.17. La taille maximale que peut atteindre ce paquet est de 1526 octets dont (46-1500) octets de données et 26 octets d'encapsulation (8 octets de Préambule, 14 octets d'entête MAC et 4 octets de CRC "Contrôle de Redondance Cyclique"). La surcharge induite par cette encapsulation est de l'ordre de 2,5% de la taille totale du paquet.

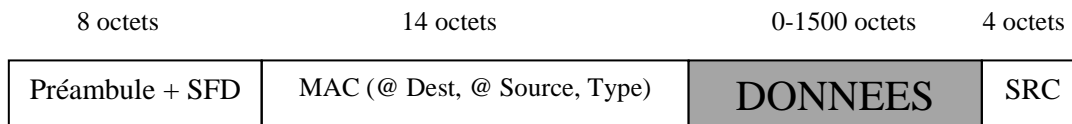


Figure II.17 : Format du paquet Ethernet du protocole IEEE 802.3

### - *Le Protocol IEEE 802.11*

La Figure II.18 représente le format du paquet dans le protocole IEEE 802.11. La taille maximale (MTU) de ce paquet est égale à 2374 octets dont 2312 octets de données et 30 octets de l'entête MAC et 4 octets de CRC. Le préambule et le PLCP (Physical Layer Convergence Procedure) représente l'entête de la couche physique avec une taille de 28 octets. Cet entête est envoyé avec le débit de base du protocole, soit 1 Mbits/s. Cela représente l'équivalent de l'envoi de 308 octets avec un débit de 11 Mbits/s. En rajoutant cette taille à l'entête du paquet nous obtenons 14,8% de surcharge totale des entêtes par rapport à la taille totale du paquet.

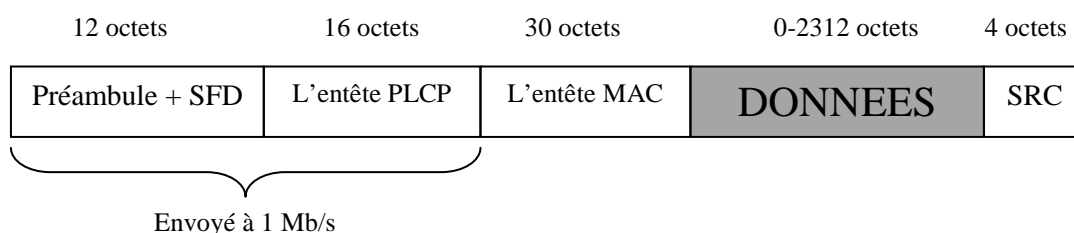


Figure II.18 : Format du paquet sans fil dans le protocole IEEE 802.11

Dans la norme IEEE 802.11, il y a trois principaux types de paquets :

- Les paquets de **données**, utilisés pour la transmission des données (DONNEES).
- Les paquets de **contrôle**, utilisés pour contrôler l'accès au support (RTS, CTS, ACK).
- Les paquets de **gestion**, utilisés pour l'échange d'informations de gestion, mais qui ne sont pas transmis aux couches supérieures (Authentification, Requête d'association, 'Beacon'...).

Les paquets de contrôle et de gestion sont échangés avec un débit de base (1 Mbits/s). Dans le protocole IEEE 802.11 la méthode d'accès au médium est CSMA avec évitement de collision, cela signifie qu'avant chaque émission la couche MAC doit attendre pendant une période de contention (CP, "Contention Period") puis une période DIFS, et pour chaque paquet de données envoyé, la couche MAC doit échanger les paquets RTS\CTS\DATA\ACK en marquant trois périodes SIFS entre ces paquets.

DIFS	RTS	SIFS	CTS	SIFS	Paquet (DONNEES + Entête MAC)	SIFS	ACK
------	-----	------	-----	------	-------------------------------	------	-----

Figure II.19 : Les opérations effectuées au niveau de la couche MAC pour chaque paquet

RTS	20 octets	Pour une Couche physique DSSS
CTS	14 octets	
ACK	14 octets	
DIFS	50 $\mu$ s	
SIFS	10 $\mu$ s	

Tableau II.4 : Paramètres du protocole IEEE 802.11b avec une couche physique DSSS

Après cet aperçu sur les formats des paquets des protocoles IEEE 802.3 et IEEE 802.11, nous discutons maintenant les résultats des simulations selon le type de réseau.

#### II.2.4.1 L'estimation dans le réseau Ethernet

Par définition, la Capacité d'un lien dépend de la technologie de transmission et la vitesse de propagation dans le médium. Selon les courbes de la Figure II.10 et la Figure II.14, les valeurs estimées de la Capacité sont quasi stables. Ils ne sont pas altérés ni par la variation du débit du *Trafic concurrent* ni par la variation de la taille des paquets. Ce qui fait

que la Capacité du réseau Ethernet respecte cette définition. Cela grâce à la stabilité des caractéristiques du medium filaire.

La BPD est définie par l'équation II.5, elle dépend du débit du *Trafic concurrent* et la Capacité du lien. La Figure II.14 montre que les valeurs de la BPD sont affectées par la variation du *Trafic concurrent*, et elles sont toujours inférieures aux valeurs de la Capacité. En effet, cette dernière est la limite supérieure du débit de données à transférer qu'un lien peut atteindre.

Dans les réseaux Ethernet, l'accès au medium est réalisé par le biais de la méthode CSMA\CD. Le taux de collision dans cette méthode est très faible. En outre, comme le montre la Figure II.17 la surcharge des informations d'encapsulation (26 octets) par rapport à la taille totale du paquet (1500 octets) est de 2,5% ; ce qui rend la méthode CSMA\CD efficace à ~ 97% [Gorry 2001]. De ce fait, il justifie les valeurs maximales estimées de la BPD et la Capacité qui sont proches des valeurs théoriques.

#### II.2.4.2 L'estimation dans le réseau Sans fil

Les résultats du réseau sans fil (Figure II.11, Figure II.15) montrent que les valeurs de la BPD et la Capacité du lien sont affectées par la variation de débit du *Trafic concurrent* et de la taille des paquets. Ces phénomènes peuvent être expliqués comme suit :

Pour chaque paquet IEEE 802.11 la surcharge d'encapsulation est de 14,8%. Si la taille des paquets est plus petite, alors la surcharge devienne plus importante. Aussi, lorsque le débit du *Trafic concurrent* augmente, le nombre de paquets en concurrence pour accéder au medium augmente et les périodes de contention augmentent aussi. Par conséquent la BPD et la Capacité réelles du lien diminuent. Nous pouvons tirer la conclusion que les paquets de sondage de plus grandes tailles détectent une large BPD que ceux de petites tailles

D'après la courbe de la Figure II.13, les valeurs maximales estimées de la BPD sont d'environ [4,00 Mbits/s, 4,50 Mbits/s]. Cette estimation est d'environ la moitié de la Capacité théorique du lien (11 Mbits/s).

D'après la Figure II.19 et le Tableau II.4, pour chaque paquet envoyé, le protocole IEEE 802.11 a besoin d'envoyer 178 octets (RTS, CTS, ACK, Entête MAC...) et attend au minimum 100µs (SIFS, DIFS, Slot time...) ce qui correspond à un envoi de ~138 octets avec un débit de 11 Mbits/s.

Cette surcharge est très importante par rapport aux données nettes à envoyer (2312 octets). Elle cause une surcharge dans le réseau qui utilise environ [45 % ; 55 %] de la capacité théorique [McGraw 2003]. Ceci justifie l'écart entre les valeurs théoriques et les valeurs estimées de la BPD et la Capacité du lien.

Finalement, nous remarquons que dans tous les cas, le protocole IEEE 802.11 est plus sensible aux variations du débit de *Trafic concurrent* et de la taille des paquets comparé au

protocole IEEE 802.3, ceci à cause du protocole d'évitement des collisions et à l'algorithme de "Backoff" utilisé par la norme IEEE 802.11 et qui consomme un temps exponentiel pour chaque collision.

Taille des paquets et Trafic concurrent  Réseaux	Effets du Trafic concurrent		Effets de la Taille des paquets	
	BPD Maximale [BPD <sub>Max</sub> – BPD <sub>Min</sub> ] (Mbits/s)	Précision BPD <sub>Pr</sub> (Mbits/s)	BPD Maximale [BPD <sub>Max</sub> – BPD <sub>Min</sub> ] (Mbits/s)	Précision BPD <sub>Pr</sub> (Mbits/s)
<b>Ethernet IEEE 802.3 (10 Mbits/s)</b>	[9,758 - 9,602]	0.078	[7,758 - 7,862]	0.052
<b>Sans fil IEEE 802.11 (11 Mbits/s)</b>	[4,278 - 4,802]	0.262	[3,254 - 2,926]	0.164

Tableau II.5 : Les valeurs maximales de la BPD et les précisions des estimations de SLoPS

La précision  $BPD_{Pr}$  ici est calculée comme suit :

$$BPD_{Pr} = \frac{(BPD_{Max} - BPD_{Min})}{2} \quad (II.26)$$

Le Tableau II.5 montre les résultats obtenus par la technique SLoPS. Les tailles d'intervalles d'estimation de la BPD ([BPD\_MIN ; BPD\_MAX]) sont faibles et avec une précision autour de 0.052 Mbits/s. Ceci est expliqué par le faible taux de collision de la couche MAC du protocole IEEE 802.3.

En ce qui concerne les résultats du réseau sans fil présentés par la Figure II.13, les valeurs maximales estimées de la BPD sont environ [4,00 Mbits/s, 4,50 Mbits/s] avec une précision de 0,25 Mbits/s. Cette estimation est d'environ la moitié de la Capacité théorique du lien (11 Mbits/s).

En outre, lorsque le nombre de paquets augmente le taux de collision devient de plus en plus élevé, ce qui perturbe le processus d'estimation et rend les valeurs d'estimation de la BPD imprécises.

## II.2.5 Critiques et Limites des techniques TOPP et SLoPS

En général, toutes les techniques d'estimation ont certaines contraintes communes liées à leur application réelle dans les réseaux. Parmi celles-ci nous citons :

- Une mise en œuvre réelle de l'estimateur de la BPD dans un réseau nécessite une coopération entre l'émetteur et le récepteur. D'où l'installation de cet estimateur dans les nœuds source et destination. Or le nœud destination peut être inaccessible (exemple : serveur sécurisé).
- Les techniques utilisent un *Trafic concurrent* constant et régulier (*modèle fluide de trafic*)

pour modéliser le trafic réel dans le réseau. Cependant, dans la réalité le trafic est irrégulier et variable.

- Afin de simplifier la complexité du modèle mathématique, les techniques d'estimation sont fondées sur des hypothèses qui permettent l'utilisation de l'équation II.5 pour estimer la BPD.
- TOPP et SLoPS assument le fait que les files d'attentes sont gérées par la politique FIFO, alors que les réseaux actuels mettent en œuvre une gestion du trafic par priorité pour garantir une certaine QoS, ce qui peut entraîner des erreurs d'estimation.

La technique SLoPS nécessite une réponse du nœud destination afin d'adapter le débit d'envoi et l'intervalle de recherche au cours du sondage.

### II.2.5.1 Le calcul des OWDs

Contrairement à la TOPP, la technique SLoPS nécessite le calcul des OWDs pour estimer la BPD. Pour calculer les OWDs les instants d'envoi et les instants de réception d'un paquet doivent être connus. Ce calcul nécessite la synchronisation des horloges des nœuds source et de la destination. Dans le cas de la simulation avec NS-2 aucun problème se pose puisque NS-2 maintient une horloge globale de la simulation. En revanche, dans la réalité les nœuds sans fil peuvent utiliser un GPS "Global Position System", pour synchroniser leurs horloges. Cette synchronisation rend la mise en pratique de la technique SLoPS difficile.

### II.2.5.2 L'aspect intrusif

Pour estimer la BPD les techniques actives injectent des paquets de sondage dans le réseau, ces paquets constituent un trafic nécessaire et superflu en même temps. Il est nécessaire pour estimer la BPD et superflu puisqu'il consomme de la BPD que nous voulons estimer. L'efficacité des techniques actives est payée par un trafic intrusif, d'où ces techniques sont aussi appelées Techniques *Intrusives* ou *Invasives*.

Certaines applications limitent leur consommation de la BPD, en fixant à l'avance la quantité du trafic de sondage à injecter dans le réseau pour estimer la BPD. Par conséquent, le processus d'estimation de la BPD s'exécute jusqu'à atteindre la quantité du trafic de sondage souhaitée. D'autres techniques, exécutent le processus d'estimation jusqu'à atteindre une certaine précision, puis elles mesurent la quantité du trafic de sondage injectée dans le réseau.

### II.2.5.3 Indéterminisme

La BPD est variable et dynamique dans le temps. Elle peut prendre plusieurs valeurs pendant le processus d'estimation. Cette variation peut conduire à une situation d'indéterminisme pour la technique SLoPS. Cette situation est détectée quand l'évolution des OWDs ne montre pas une claire augmentation ou une tendance à la hausse. Cela est à cause



de pertes des paquets où le calcul des OWDs est impossible pour le paquet perdu, ce qui perturbe la détection de leur évolution. Dans ce cas, l'estimation est dans une «**Région d'incertitude**». L'état de la Région d'incertitude est imprévisible.

#### II.2.5.4 Convergence et Précision

Les principales différences entre SLoPS et TOPP sont le temps de convergence de la phase de sondage et la précision des résultats. Au lieu d'utiliser une stratégie linéaire comme la technique TOPP, la technique SLoPS utilise une stratégie binaire pour la recherche de la BPD. Cette stratégie a l'avantage de diviser l'intervalle de recherche en deux à chaque itération. Cela permet à SLoPS de posséder un délai de convergence plus court par rapport à TOPP. Néanmoins, la stratégie binaire utilisée par la technique SLoPS donne des résultats sous forme d'intervalle, ce qui affecte la précision de cette technique par rapport à celle de TOPP.

Avoir une estimation rapide de BPD est une caractéristique très importante de la technique d'estimation. Cette caractéristique demeure importante quand cela concerne une application temps réel et particulièrement le réseau Ad Hoc sans fil. Les paramètres les plus importants que nous devons améliorer sont la précision des résultats et le temps de convergence de ces techniques

#### II.2.5.5 La simulation et les réseaux réels

Le simulateur des réseaux NS-2 [NS-2 2008] est un logiciel qui simule les réseaux informatiques filaires et sans fil. Dans un tel environnement, tous les paramètres sont connus et par conséquent très bien approprié pour tester et évaluer les techniques d'estimation de la BPD. Les topologies réseau, les liens sans fil, ainsi la distribution du *Traffic Concurrent* sont simulés. Cependant, dans le monde réel le comportement des réseaux est imprévisible.

En outre, le modèle du lien sans fil dans NS-2 est basic, c'est-à-dire tous les effets électromagnétique du signal radio ne sont pas modélisés (les interférences, l'effet doppler, l'affaiblissement du signal et le multi-trajet). Tandis qu'une simulation doit représenter la situation réelle. Par conséquent, pour créer un modèle d'un réseau Ad Hoc sans fil, des simplifications doivent être faites, ce qui nous amène à trouver différence entre les résultats obtenus à partir des modèles de simulations et ceux obtenus à partir d'un réseau sans fil réel.

### II.3 Synthèse

Dans la première partie de ce chapitre nous avons présenté le principe de fonctionnement des techniques d'estimations basées sur la dispersion des paquets. Nous avons choisi les plus connus de ces techniques TOPP et SLoPS. En outre, TOPP et SLoPS utilisent le même principe d'estimation de la BPD ; ce qui nous permet de les évaluer ensemble.

Dans la deuxième partie de ce chapitre nous avons étudié l'effet de variation de la taille des paquets et le débit du *Trafic concurrent* sur les estimations de la BPD et la Capacité du lien. Pour réaliser ces mesures, les techniques TOPP et SLoPS ont été implémentées sur les réseaux Ethernet et sans fil.

TOPP et SLoPS utilisent le même principe pour détecter la BPD. Elles détectent le dépassement du débit de la BPD par le débit d'envoi. A chaque itération, le débit d'envoi est adapté pour être plus précis et plus proche de la valeur de la BPD. Néanmoins, elles utilisent des stratégies de sondage différentes. SLoPS adapte le débit d'envoi en utilisant une stratégie binaire « dichotomique ». Le résultat final obtenu est un intervalle de variation du débit de la BPD. D'autre part, TOPP change le débit d'envoi en utilisant une stratégie linéaire « Incrémentale ». En plus de l'estimation de la BPD, TOPP permet d'estimer la Capacité du lien.

# **Chapitre III**

## **Contributions : Vers des nouvelles techniques d'estimation de la BPD**

### **Sommaire**

---

#### **III.1 SLOT : Une nouvelle technique d'estimation de la BPD**

- III.1.1 Introduction
- III.1.2 Modélisation du problème
- III.1.3 Contribution : La technique SLOT (SLOps-Topp)
- III.1.4 Simulation
- III.1.5 Limites et critiques de la technique SLOT

#### **III.2 TOPP-NET (Train Of Packet Pair Non-invasive Estimation Technique)**

- III.2.1 Introduction
- III.2.2 La technique NIMBE (Non Invasive Manet Bandwidth Estimation)
- III.2.3 Contribution : La technique TOPP-NET
- III.2.4 Implémentation de TOPP-NET
- III.2.5 Evaluation de la précision et du délai de sondage dans TOPP-NET
- III.2.6 Limites et critiques de la technique TOPP-NET

#### **III.3 Synthèse**

---

Avoir des estimations précises de BPD est une caractéristique fondamentale de la technique d'estimation, elle permet aux applications qui utilisent l'estimateur de la BPD de réagir correctement aux changements de trafic du réseau. Avoir des estimations précises signifie avoir des valeurs de la BPD les plus proches possible de la réalité. La rapidité de l'estimation est une autre caractéristique importante de la technique d'estimation de la BPD. Cette caractéristique se traduit par le délai de sondage de l'algorithme d'estimation, il demeure primordial quand cela concerne une application temps réel (surveillance médicale des patients). Ces applications imposent des contraintes temporelles et exigent des réponses rapides de la part des estimateurs de la BPD. Le délai de sondage de l'algorithme d'estimation de la BPD et la précision des estimations sont parmi les problématiques les plus posées aux chercheurs.

Dans ce chapitre nous présentons nos contributions qui constituent de deux techniques d'estimation de la BPD. Dans la première partie de ce chapitre nous détaillons la technique SLOT qui est le résultat de la combinaison des techniques TOPP et SLoPS tout en profitant des avantages des deux techniques. Pour la deuxième partie, la technique TOPP-NET qui est une amélioration de la technique SLOT en remplaçant la technique SLoPS par une autre technique non intrusive appelée NIMBE. Les modèles de ces techniques seront expliqués dans les deux parties de ce chapitre.

## **III.1 SLOT : Une nouvelle technique d'estimation de la BPD**

### **III.1.1 Introduction**

Une technique d'estimation idéale devrait fournir une estimation précise de la BPD aussi rapidement que possible. L'importance de ces caractéristiques découle principalement de la variabilité de la topologie des réseaux Ad Hoc sans fil et de la limitation de la bande passante. De plus, des estimations précises ont besoin d'un temps de sondage assez long.

Les techniques TOPP et SLoPS fournissent une approche d'estimation de la BPD plus flexible et plus souple [Prasard 2003]. En outre, elles peuvent être utilisées pour les différentes technologies de réseau. Les valeurs de la BPD estimées sont obtenues en vérifiant si le débit d'envoi dépasse la BPD ou non. De nombreuses autres techniques et outils d'estimations actives de la BPD ont été proposés récemment, mais peu d'attention a été accordée simultanément à la précision des résultats et au délai de sondage du réseau.

Dans cette partie nous évaluons ces deux paramètres des techniques TOPP et SLoPS. Ainsi, nous avons décidé de combiner les deux techniques pour tirer parti de leurs avantages respectifs et de proposer une nouvelle technique d'estimation de la BPD appelée SLOT (SLOps-Topp), plus rapide et aussi précise que TOPP. Les performances de SLOT sont évaluées par simulation sous l'environnement NS-2. Les résultats obtenus sont analysés par le logiciel MATLAB.

Le modèle mathématique du problème en termes de précision et de délai de sondage des techniques SLoPS et TOPP est décrit dans la section.III.1.3.2. Dans la section III.1.3, nous décrivons les différentes idées de notre contribution avec l'algorithme de SLOT qui combine les deux techniques. La simulation et ses scénarios mis en place pour valider notre solution sont présentés dans la section III.1.4. Dans la section III.1.4.2 nous montrons les résultats et les discussions de notre simulation. A la fin de cette partie nous présentons les critiques de la technique SLOT dans dernière section III.1.5.

### III.1.2 Modélisation du problème

Les valeurs de la BPD que nous devons estimées sont comprises dans un intervalle initial  $[R_{\min}^0 ; R_{\max}^0]$ , avec  $R_{\min} = 0$  et  $R_{\max}$  est la valeur maximale théorique de la bande passante de la technologie d'un réseau (11Mb/s, 54Mb/s...). En se basant sur le travail de [Pujolle 2003] (Figure I.8), nous fixons le  $R_{\max}$  à 6 Mb/s pour la norme IEEE 802.11b et à 9 Mb/s pour la norme IEEE 802.3 (avec 10 Mb/s). Cet intervalle constitue l'intervalle de recherche de la BPD des techniques d'estimation TOPP et SLoPS.

Dans le chapitre 2 nous avons montré que TOPP utilise une stratégie de sondage linéaire (incrémentale) pour estimer la BPD. Cette stratégie nécessite un temps de sondage assez long. Toutefois TOPP fournit des résultats assez précis. D'autre part, SLoPS effectue une recherche binaire (dichotomique) de la BPD, ce qui rend cette technique assez rapide. SLoPS donne comme résultat un intervalle de variation de BPD estimée, plutôt qu'une seule valeur d'où son imprécision. Face au problème posé par le réseau Ad Hoc sans fil, nous avons besoin d'estimer la BPD avec précision en très peu de temps. D'après la littérature actuelle, nous n'avons pas trouvé un outil ayant à la fois une grande précision et un délai de sondage court.

L'objectif de cette section est la formalisation mathématique des problèmes en développant les modèles mathématiques de la phase de sondage des deux techniques TOPP et SLoPS. Puis nous évaluons les paramètres de la précision et de délai de sondage et la relation entre eux.

#### III.1.2.1 Précision et délai de sondage dans TOPP

Dans le deuxième chapitre, la Figure II.3 illustre la phase de sondage de la technique TOPP. Cette phase de sondage est composée de plusieurs itérations. A la  $I^{\text{ième}}$  itération, le flux du train de paires de paquets est envoyé avec un débit d'entrée  $R_{\text{in}}^I$ . TOPP commence avec un débit d'envoi initiale  $R_{\min}^0$  pour la première itération. Pour chaque nouvelle itération le débit  $R_{\text{in}}^I$  est augmenté linéairement par un taux  $\Delta R_{\text{in}}$ . Le choix de  $R_{\min}^0$  et  $\Delta R_{\text{in}}$  dépend de l'intervalle initial de recherche et de la précision souhaitée (dans notre simulation du chapitre 2  $R_{\min}^0 = 1\text{MB/s}$  et  $\Delta R_{\text{in}} = 100\text{ Kb/s}$ ). Ainsi,  $R_{\text{in}}^I$  peut être exprimé par cette équation :

$$R_{in}^I = R_{min}^0 + I * \Delta R_{in} \quad (III. 1)$$

I est le nombre d'itérations, le nombre d'itérations maximum nécessaire pour détecter la BPD est donné par l'équation suivante :

$$I = \frac{(R_{max}^0 - R_{min}^0)}{\Delta R_{in}} \quad (III. 2)$$

Le temps nécessaire pour une phase de sondage de I itérations de la technique TOPP est exprimé comme suit :

$$D_{Topp} = [\tau M + T_{NI} (M - 1)] * I \quad (III. 3)$$

Par substitution de l'équation (III.2) dans (III.3)

$$D_{Topp} = [\tau M + T_{NI} (M - 1)] * (R_{max}^0 - R_{min}^0) / \Delta R_{in} \quad (III. 4)$$

$\tau$  est la durée d'un train de paires de paquets donnée par l'équation II.10, M est le nombre de trains par flux et  $T_{NI}$  est le temps qui sépare deux trains (Section II.1.3). Une fois que toutes les paires de paquets sont reçues, la destination analyse les dispersions de sortie  $T_{out}^I$ . D'après l'équation III.4, nous pouvons déduire que le délai de sondage est inversement proportionnel au  $\Delta R_{in}$ . Pour avoir une grande précision, la valeur de  $\Delta R_{in}$  doit être petite. Cette proportionnalité rend le délai de sondage assez long avant de détecter la BPD. Cette situation s'aggrave quand les valeurs de la BPD sont proches de  $R_{max}$ . La Figure II.4 montre que la technique TOPP nécessite un délai de sondage assez long avant de détecter la BPD.

TOPP détecte la BPD à la  $I^{i\text{ème}}$  itération lorsque le rapport  $\frac{R_{in}^I}{R_{out}^I}$  commence à dépasser la valeur 1, (i.e. lorsque  $\frac{R_{in}^I}{R_{out}^I} \gtrsim 1$ ). Ce la signifie que  $R_{in}^I \gtrsim R_{out}^I$ . Pour détecter un tel dépassement, le noeud destination vérifie la condition suivante :

$$\frac{R_{in}^{I+1}}{R_{out}^{I+1}} \geq \frac{R_{in}^I}{R_{out}^I} \geq \frac{R_{in}^{I-1}}{R_{out}^{I-1}} \geq 1 \quad (III. 4)$$

A cet instant la destination calcule la  $BPD_{topp}$  avec une précision  $P_{topp}$  tel que :

$$BPD_{topp} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \frac{(R_{in}^I + R_{out}^I)}{2} \quad (III. 5)$$

Les distances de la BPD par rapport aux débits d'envoi et de réception sont calculées

$$\begin{cases} E(R_{in}) = [Max(R_{in}^{I-1}, R_{in}^I, R_{in}^{I+1}) - BPD_{topp}] \\ E(R_{out}) = [BPD_{topp} - Min(R_{out}^{I-1}, R_{out}^I, R_{out}^{I+1})] \end{cases} \quad (III. 6)$$

La précision est calculée comme suit :

$$P_{\text{topp}} = \frac{[E(R_{in}) + E(R_{out}) + \Delta R_{in}]}{3} \quad (\text{III. 7})$$

### III.1.2.2 Précision et délai de sondage dans SLoPS

En utilisant l'intervalle initial  $[R_{\min}^0 ; R_{\max}^0]$  la technique SLoPS entame un sondage dichotomique de la BPD. Ce sondage est effectué en divisant à chaque nouvelle itération l'intervalle de recherche en deux (Equation II.16). La Figure II.5 montre le déroulement de la phase de sondage de SLoPS, à chaque itération  $I$ , la source envoie un flux de paquets avec un nouveau débit  $R_{in}^I$  à la destination. La recherche s'arrête quand les OWDs augmentent constamment et l'intervalle de recherche est inférieure ou égale à la précision désirée. Le délai  $\tau$  de chaque flux est exprimé comme suit :

$$\tau = (k - 1) T_{in} \quad (\text{III. 8})$$

Rappelons que l'algorithme général de la technique SLoPS commence le sondage avec un débit d'envoi  $R_{in}^0$  donné par les formules suivantes :

$$R_{in}^0 = \frac{(R_{\max}^0 + R_{\min}^0)}{2} \quad (\text{III. 9})$$

$$\begin{cases} \text{Si } R_{in}^0 < BPD \text{ Alors } R_{\min}^1 = R_{in}^0 \text{ Sinon } R_{\max}^1 = R_{in}^0 \\ \text{Le sondage s'arrête quand } (R_{\max}^J - R_{\min}^J) \leq \theta \end{cases}$$

Par récurrence, à la  $J^{\text{ième}}$  itération, l'équation III.9 devienne :

$$R_{in}^{J-1} = \frac{(P * R_{\max}^0 + Q * R_{\min}^0)}{2^J} \quad (\text{III. 10})$$

Où  $P, Q \in \mathbb{N}$  et  $P + Q = 2^J$

Dans le cas le plus défavorable (le cas où le sondage est le plus long possible) quand les valeurs de la BPD sont proches de  $R_{\min}^0$  ou  $R_{\max}^0$  et par récurrence l'équation III.10 est réécrite comme suit :

$$\begin{cases} R_{in}^{J-1} = R_{\max}^0 - \frac{(R_{\max}^0 - R_{\min}^0)}{2^J} \text{ Quand la BPD est } \sim > R_{\max}^0 \\ \text{Ou} \\ R_{in}^{J-1} = R_{\min}^0 + \frac{(R_{\max}^0 - R_{\min}^0)}{2^J} \text{ Quand la BPD est } \sim > R_{\min}^0 \\ R_{\min}^0 < R_{in}^{J-1} < R_{\max}^0 \end{cases} \quad (\text{III. 11})$$

D'où

$$\begin{cases} 2^J = \frac{(R_{max}^0 - R_{min}^0)}{(R_{max}^0 - R_{in}^{J-1})} & \text{Quand la BPD est } \sim > R_{max}^0 \\ \text{Ou} \\ 2^J = \frac{(R_{max}^0 - R_{min}^0)}{(R_{in}^{J-1} - R_{min}^0)} & \text{Quand la BPD est } \sim > R_{min}^0 \end{cases} \quad (III. 12)$$

Les numérateurs du système d'équation III.12 sont constants et les dénominateurs constituent l'intervalle résultant de la recherche dichotomique. Cet intervalle contient la valeur de la BPD après l'arrêt du processus de sondage. Sachant que  $\theta$  est la précision désirée de la technique SLoPS qui limite le processus de sondage. Par conséquent, les dénominateurs doivent être bornés par  $\theta$  et deviennent :

$$\begin{cases} (R_{max}^0 - R_{in}^{J-1}) \geq \theta \\ \text{Et} \\ (R_{in}^{J-1} - R_{min}^0) \geq \theta \end{cases}$$

Alors le système d'équations III.12 sera réduit à cette expression :

$$2^J \leq (R_{max}^0 - R_{min}^0) / \theta \quad (III. 13)$$

Le processus de sondage de SLoPS converge vers l'intervalle  $[R_{max}^J, R_{min}^J]$  tel que  $(R_{max}^J - R_{min}^J) \leq \theta$ . Cet intervalle contient la valeur de la BPD. Le nombre  $J$  d'itérations maximum est exprimé par l'équation suivante :

$$J = \log_2[(R_{max}^0 - R_{min}^0) / \theta] \quad (III. 14)$$

Le délai de sondage de la technique SLoPS est :

$$D_{Slops} = [\tau M + T_{NI} (M - 1)] * J \quad (III. 15)$$

Selon l'équation III.10, le débit du flux varie exponentiellement par rapport aux variations du nombre d'itérations. L'intervalle de recherche est divisé en deux à chaque itération. Alors SLoPS a besoin d'un délai court pour détecter la BPD.

Les équations III.14 et III.15 montrent que la précision est inversement proportionnelle au nombre d'itérations et par conséquent au délai de sondage. Bien que l'équation III.14 montre que le nombre d'itération de SLoPS est limité et inférieur de celui de TOPP à cause de la recherche dichotomique. Par conséquent la phase de sondage de SLoPS est plus rapide que celle de TOPP. En revanche le résultat de SLoPS est un intervalle de variation de la BPD et moins précis que celui de TOPP.



À la  $J^{\text{ième}}$  itération, lorsque  $(R_{\max}^J - R_{\min}^J) \leq \theta$  est vérifiée et les variations des OWDs montrent une croissance le sondage de SLoPS s'arrête. L'intervalle résultat est  $[R_{\max}^J, R_{\min}^J]$ . Cet intervalle est utilisé selon l'application et l'utilisation de l'estimation de la BPD. Nous pouvons considérer la valeur médiane de l'intervalle comme la valeur moyenne de la BPD avec une précision  $P_{\text{slops}}$ , tel que :

$$\text{BPD}_{\text{slops}} = \frac{(R_{\max}^J + R_{\min}^J)}{2} \quad (\text{III. 16})$$

$$P_{\text{slops}} = \frac{(R_{\max}^J - R_{\min}^J)}{2} \quad (\text{III. 17})$$

### III.1.3 Contribution : La technique SLOT (SLOps-Topp)

#### III.1.3.1 Principe

La technique SLOT est le résultat de nos travaux sur les deux techniques précédentes. L'analyse des comportements des techniques TOPP et SLoPS montre que TOPP fournit des résultats plus précis que SLoPS. Cependant, elle nécessite un délai très long pour atteindre cette précision.

Notre proposition consiste de combiner les deux techniques en prenant en considération la convergence rapide de SLoPS et la précision des estimations de la BPD de TOPP. Contrairement à TOPP et SLoPS, la phase de sondage de SLOT est divisée en deux étapes (Figure III.1). La première étape consiste à une recherche binaire rapide dans l'intervalle initial de la BPD en utilisant la technique SLoPS. Le résultat de cette étape est un intervalle plus restreint que l'intervalle initial de TOPP. La deuxième étape est une recherche linéaire dans l'intervalle résultat obtenu au cours de la première étape. Ainsi, en utilisant la technique TOPP dans cet intervalle, SLOT permet d'obtenir des estimations plus précises et plus rapides des valeurs de la BPD.

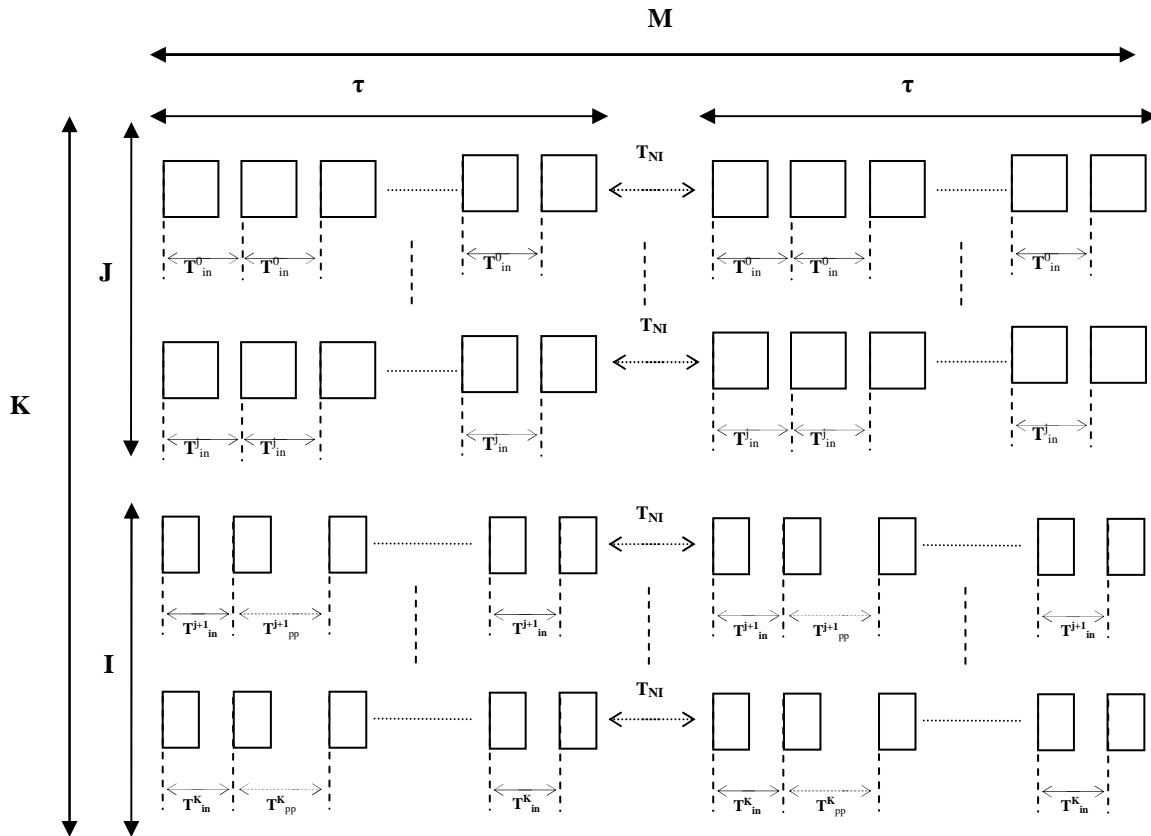


Figure.III.1 : Le modèle de sondage dans la technique SLOT.

- J est les nombres d'itérations de la première étape de la phase de sondage
- I est les nombres d'itérations de la deuxième étape de la phase de sondage

La Figure III.1 montre le déroulement de la phase de sondage de la technique SLOT. Dans la première étape de la phase de sondage nous utilisons la même stratégie de sondage que la technique SLoPS. Cette étape consiste à envoyer plusieurs flux, chaque flux est composé de K paires de paquets de taille égale et avec un temps de dispersion  $T_{in}$ . Dans cette étape le nombre d'itérations et le temps de sondage dépendent de la taille optimale de l'intervalle des valeurs de la BPD. L'objectif de cette étape est de minimiser le temps de recherche de la BPD.

La deuxième étape consiste à utiliser une stratégie de sondage similaire à celle de la technique TOPP. Avec la particularité d'utiliser l'intervalle résultat de la première étape pour la recherche de la valeur de la BPD au lieu de l'intervalle initial qui est plus grand. Ainsi, la détection de la BPD est réalisée avec la mesure de  $R_{out}$  et le rapport  $R_{in} / R_{out}$ . L'objectif de cette étape est d'avoir des valeurs d'estimation de la BPD plus précises.

Ainsi, il est nécessaire de répondre aux questions suivantes : Quelle est la valeur optimale de la taille d'intervalle de la BPD pour arrêter la première étape de sondage pour que la deuxième étape commence ? Est ce que le délai de sondage de la technique SLOT est inférieur à celui de TOPP et les résultats d'estimation de la technique SLOT sont-ils plus précises que ceux de la technique SLoPS ? Dans la section suivante, nous développerons un modèle mathématique pour répondre à ces questions.

### III.1.3.2 Modèles Mathématiques

Selon le principe de sondage de la technique SLOT le nombre d'itérations  $K$  est exprimé de la façon suivante :

$$K = I + J \quad (III. 18)$$

Si nous considérons que la première étape s'arrête à un intervalle  $\omega = [R_{max}^I ; R_{min}^I]$ . Cet intervalle sera l'intervalle d'entrée pour la deuxième étape, alors l'équation III.2 sera réécrite de la façon suivante :

$$I = \omega / \Delta R_{in} \quad (III. 19)$$

Selon l'équation III.14,  $J$  est formulé comme suit :

$$J = \log_2[(R_{max}^0 - R_{min}^0) / \theta] \quad (III. 20)$$

Ainsi l'équation III.12 devient :

$$\begin{aligned} K &= \log_2[(R_{max}^0 - R_{min}^0) / \theta] + \omega / \Delta R_{in} \\ K &= \log_2(R_{max}^0 - R_{min}^0) - \log_2(\theta) + \omega / \Delta R_{in} \end{aligned} \quad (III. 21)$$

La précision souhaitée  $\theta$  de la première étape qui correspond à la précision de la technique SLoPS doit être égale à la taille de l'intervalle  $\omega$ . Ce dernier va être utilisé en tant qu'un intervalle d'entrée pour la deuxième étape qui correspond à une exécution de la technique TOPP. Dans ce cas là, l'équation III.21 peut être réécrite comme suit :

$$K = \log_2(R_{max}^0 - R_{min}^0) - \log_2(\omega) + \omega / \Delta R_{in} \quad (III. 22)$$

Tel que  $\theta = \omega$ .

La fonction  $K$  est croissante monotone, alors elle atteint sa valeur maximale quand sa dérivée est nulle.  $K' = 0$  :

$$K' = -1 / \omega * \ln 2 + 1 / \Delta R_{in} = 0 \quad (III. 23)$$

Ainsi :

$$\omega = \Delta R_{in} / \ln 2 \quad \text{Avec } \ln 2 < 1 \quad (III. 24)$$

Et

$$\log_2(\omega) = \log_2(\Delta R_{in}) - \log_2(\ln 2)$$

Par une substitution des valeurs de  $\omega$  et  $\log_2(\omega)$  dans l'équation III.22 le nombre maximum d'itérations  $K$  de la technique SLOT est donné par cette équation :

$$K = \log_2(R_{max}^0 - R_{min}^0) - \log_2(\Delta R_{in}) + \log_2(\ln 2) + 1/\ln 2$$

$$K = \log_2[(R_{max}^0 - R_{min}^0)/\Delta R_{in}] + \underbrace{\log_2(\ln 2) + 1/\ln 2}_{\approx 1}$$

$$K = \log_2[(R_{max}^0 - R_{min}^0)/\Delta R_{in}] + 1 \quad (III. 25)$$

Le délai de sondage maximum de la technique SLOT peut être exprimé comme suit :

$$D_{slot} = [\tau M + (M - 1)T_{NI}] * K \quad (III. 26)$$

### III.1.3.3 Précision et délai de sondage dans SLOT

La première étape de la phase de sondage de SLOT doit s'arrêter quand l'intervalle résultat atteint sa valeur optimale qui vérifie l'équation III.24. A partir de cet intervalle la deuxième étape se déclenche pour chercher la valeur de la BPD en utilisant une stratégie linéaire.

En comparant les équations III.2 et III.25 nous remarquons que le nombre maximum d'itérations de la technique SLOT est beaucoup plus faible que celui de la technique TOPP. Les équations III.4 et III.26 montrent que les délais de sondage dépendent du nombre d'itérations. Par conséquent le délai de sondage de la technique SLOT est inférieur à celui de TOPP, et la phase de sondage de SLOT est plus rapide que celle de TOPP.

D'autre part, l'équation III.24 montre que la valeur  $\Delta R_{in}$  est inférieure à la taille d'intervalle  $\omega$  de la première phase et à l'intervalle  $\theta$  de la technique SLoPS. D'où la plus grande précision des valeurs d'estimations de la BPD dans la technique SLOT par rapport à ceux de SLoPS.

Dans la section suivante l'algorithme de la technique SLOT est développé pour mettre en exécution ces modèles mathématiques. Cet algorithme sert à développer une simulation en C++ sous NS-2 (Network Simulator Version 2) pour valider les formules mathématiques que nous avons obtenues. L'objectif de cette simulation est de comparer les performances de la technique SLOT à ceux de TOPP et SLoPS du point de vue précision et délais de sondage.

La détection de la BPD dans SLOT est la même que celle de la technique TOPP. Par conséquence, la BPD<sub>slot</sub> et sa précision P<sub>slot</sub> correspondante sont exprimées comme suit :

$$BPD_{slot} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \frac{(R_{in}^I + R_{out}^I)}{2} \quad (III. 27)$$

$$P_{\text{Slot}} = \frac{[E(R_{in}) + E(R_{out}) + \Delta R_{in}]}{3} \quad (\text{III. 28})$$

### III.1.3.4 Algorithme de SLOT

Ici nous nous contentons de présenter l'algorithme général de la technique SLOT avec ses deux étapes de sondage binaire et linéaire.

#### SLOT Algorithm

##### BEGIN

##### <Initialisation>

// ----- première Etape ----- //

$R_{\min}^0 = 0$  Mbps; // Minimum value

$R_{\max}^0 = 11$  Mbps; // Theoretical capacity

$i=0$  ;

$R_{in}^0 = (R_{\min}^0 + R_{\max}^0) / 2$ ;

##### Repeat

For  $j=0$  to  $K$  {Each  $T_{in}$  Send  $Pkt^j$  To Receiver}

Receive ( $\Delta\_OWD$ ) //  $\Delta\_OWD = E(D_{j+1} - D_j)$ ,  $D_j = T_{sendj} - T_{recievej}$

If ( $\Delta\_OWD > 0$ ) Then  $R_{\max}^i = R_{in}^i$  // OWD Increasing Trend,  $R_{in}^i > AvaiBw$

Else  $R_{\min}^i = R_{in}^i$  // Decreasing Delay Trend,  $R_{in}^i < AvaiBw$

$I=I+1$ ;

$R_{in}^i = (R_{\min}^i + R_{\max}^i) / 2$ ;

Until  $((R_{\max} - R_{\min}) < \omega)$  // for example  $\omega = 100$  Kbps

// ----- Seconde Etape ----- //

##### Repeat

$T_{in} = \text{Pakt\_Size} / R_{in}^i$ ;

For  $j=0$  to  $K$  {Each  $T_{in}$  Send  $Pkt^j$  To Receiver}

Receive ( $R_m$ ) //  $R_m = \text{Pakt\_Size} / T_{out}$

$I=I+1$ ;

$R_{in}^i = R_{in}^i + \Delta R_{in}$

Until  $(R_{in} / R_m) > 1$  // The AvaiBw is detected

$AvaiBw = R_{in}^i$

##### END

### III.1.4 Simulation

La simulation est implémentée sous NS-2, et composée de quatre scénarios. Chaque scénario correspond à un débit du *Traffic Concurrent* (0, 2, 3 et 4 Mb/s). Nous avons exécuté chaque scénario cinq fois et nous avons calculé la moyenne de la précision et du délai de sondage pour chaque scénario.

#### III.1.4.1 Topologie du réseau

L'évaluation de SLOT est faite dans les réseaux sans fil. La Figure III.2 présente les nœuds qui composent le réseau de simulation. Chaque nœud utilise la norme sans fil IEEE 802.11b avec une capacité théorique de 11Mb/s. Les nœuds sont aléatoirement placés dans un diamètre au maximum de 400 mètres.

La simulation consiste à maintenir le même débit de *Traffic Concurrent* entre les nœuds C et D tout au long de la phase de sondage et les nœuds A et B échangent un trafic de sondage afin d'estimer la BPD du chemin qui les séparent. Les paramètres de simulation qui sont mesurés pour chaque technique sont : les valeurs d'estimation de la BPD, le délai de sondage et la précision des estimations. Le CBR (Constant Bit Rate) est utilisé pour générer le *Traffic Concurrent*.

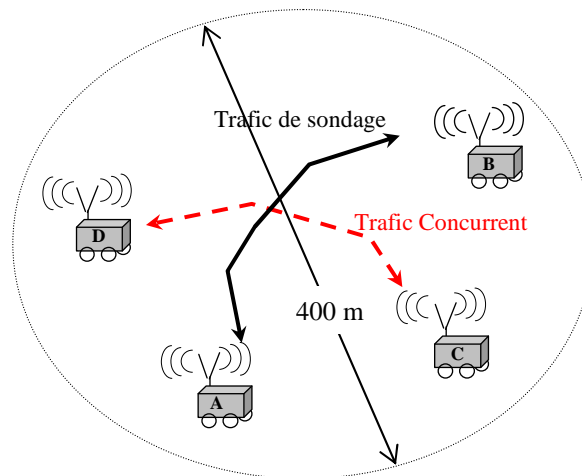


Figure.III.2 : La topologie du réseau sans fil.

- A--B : pour le trafic de sondage.
- D--C : pour le Trafic concurrent.

Notre simulation est composée de quatre scénarios. Pour chaque scénario, les trois techniques : SLOT, TOPP et SLoPS sont appliquées. Pour comparer efficacement les résultats d'estimations de la BPD des trois techniques, différents débits du *Traffic Concurrent* sont utilisés. Dans le premier scénario le débit de *Traffic Concurrent* est égal à 0 Mb/s pour prendre en considération le cas d'estimation de la BPD sans perturbation d'un autre trafic extérieur. Dans les trois autres scénarios les débits du *Traffic Concurrent* utilisés sont 2, 3 et 4 Mb/s.

Pour la technique SLoPS les tailles des paquets sont variables entre 200 octets (pour éviter l'effet des entêtes de la couche IP [Pasztor 2002]) et 1500 octets (unité maximum de transfert) [McGraw 2003]. La taille des paquets utilisés dans la technique de TOPP est de 2200 octets. Dans la technique SLOT, les tailles de paquet utilisées dans la première phase de sondage sont les mêmes que le SLoPS (entre 200 octets et 1500 octets), mais dans la deuxième phase de sondage la taille des paquets est de 2200 octets. Pour toutes les techniques chaque train de paires de paquets est de 10 paquets ( $K=10$ ).

Les tableaux suivants récapitulent les paramètres de la simulation et des techniques d'estimation:

- *Les paramètres de TOPP :*

TOPP	
Paramètres	Valeur
$R_{\max}$	11 Mb/s
$R_{\min}$	1 Mb/s
K	10
M	2
$\Delta R_{\text{in}}$	100 Kb/s
$\tau$	120 ms
$T_{\text{NI}}$	120ms

Tableau.III.1 : Les paramètres de TOPP

- *Les paramètres de SLoPS :*

SLoPS	
Paramètres	Valeur
$R_{\max}$	11 Mb/s
$R_{\min}$	1 Mb/s
M	2
$\theta$	500Kb/s
$\tau$	120 ms
$T_{\text{NI}}$	120ms

Tableau.III.2 : Les paramètres de SLoPS

- **Les paramètres de SLOT :**

SLOT	
Paramètres	Valeur
$\Delta R_{in}$	50 Kb/s
K	10
M	2
$T_{in}$	22 ms
$\tau$	120 ms
$T_{NI}$	120ms

Tableau.III.3 : Les paramètres de SLOT

- **Les paramètres de simulation :**

Simulation	
Paramètres	Valeur
Nœuds	4
<i>Distance</i>	~400 m
L	2200 octets
<i>Trafic Concurrent</i>	0, 2, 3, 4 Mb/s
<i>Scénarios</i>	4
<i>Exécution</i>	5 fois pour chaque scénario

Tableau.III.4 : Les paramètres de la simulation

Les valeurs des paramètres de la BPD, *le délai de sondage*, et *la précision* de chaque technique sont mesurés et archivés dans un fichier texte. Les données seront traitées et analysées par le programme MATLAB. Les résultats obtenus seront illustrés par des graphiques et expliqués en détail dans la section suivante.

### III.1.4.2 Résultats

Dans cette section nous présentons et nous discutons les résultats de la simulation décrite précédemment. Les résultats sont présentés dans deux étapes, d'abord, nous présentons les délais de sondage en fonction des valeurs de la BPD estimées de chaque technique. Deuxièmement, la précision des estimations en fonction des valeurs de la BPD de chaque technique sont présentées. Les délais de sondage et les précisions sont calculés avec différents débits du *Trafic Concurrent*. Pour comparer entre les résultats des trois techniques nous présentons leurs résultats sur le même graphe (Figure III.3 et Figure III.4) en appliquant une



interpolation linéaire sur les résultats de la simulation qui sont présentés dans les Tableaux III.5 et III.6.

$$\widehat{\text{BPD}}_{\text{topp}} = \frac{\sum_{s=1}^5 \text{BPD}_{\text{topp}}^s}{5}, \quad \widehat{\text{BPD}}_{\text{slot}} = \frac{\sum_{s=1}^5 \text{BPD}_{\text{slot}}^s}{5}$$

Pour SLoPS nous avons calculé la moyenne des extrémités des intervalles de la BPD :

$$\begin{cases} \widehat{\text{BPD}}_{\min} = \frac{\sum_{s=1}^5 \text{BPD}_{\min}^s}{5} \\ \widehat{\text{BPD}}_{\max} = \frac{\sum_{s=1}^5 \text{BPD}_{\max}^s}{5} \end{cases}$$

#### a) Délai de sondage

Cette section présente la comparaison entre les délais moyens de sondage des techniques que nous calculons de la façon suivante :

$$\widehat{D}_{\text{Slops}} = \frac{\sum_{s=1}^5 D_{\text{Slops}}^s}{5}, \quad \widehat{D}_{\text{topp}} = \frac{\sum_{s=1}^5 D_{\text{topp}}^s}{5}, \quad \widehat{D}_{\text{slot}} = \frac{\sum_{s=1}^5 D_{\text{slot}}^s}{5}$$

Le Tableau.III.5 montre les valeurs estimées de la BPD et les délais moyens de sondage correspondant pour chaque débit du *Trafic Concurrent*. Les courbes de la Figure III.3 montrent l'évolution des délais de sondages de chaque technique en fonction de la BPD. Ces courbes sont obtenues en appliquant une interpolation linéaire sur les valeurs du Tableau III.5.

Trafic Concurrent (Mb/s)	SLoPS		TOPP		SLOT	
	$[\widehat{\text{BPD}}_{\min}, \widehat{\text{BPD}}_{\max}]$ (Mb/s)	$\widehat{D}_{\text{Slops}}$ (s)	$\widehat{\text{BPD}}_{\text{Topp}}$ (Mb/s)	$\widehat{D}_{\text{Topp}}$ (s)	$\widehat{\text{BPD}}_{\text{Slot}}$ (Mb/s)	$\widehat{D}_{\text{Slot}}$ (s)
0	[4.72, 5.84]	2.8	5.53	4.21	5.78	3.15
2	[2.98, 3.56]	0.57	3.37	2.71	3.47	0.87
3	[2.09, 2.43]	0.34	2.26	1.3	2.24	0.71
4	[1.07, 2.02]	2.01	1.75	0.41	1.87	1.05

Tableau.III.5 : Résultats de la simulation : Les délais de sondage de SLoPS, TOPP et SLOT

La première remarque sur ces courbes est que les délais de sondage de la technique TOPP sont proportionnels aux valeurs estimées de la BPD. Quand les valeurs estimées de la BPD sont petites et comprises dans [0 Mb/s ; 2Mb/s] TOPP converge plus rapidement que SLoPS et SLOT. Dans ce cas les valeurs de la bande passante sont proches de  $R_{\min}$  et TOPP n'a pas besoin de grand nombre d'itérations pour atteindre la BPD. Par conséquence, elle consomme peu de temps dans phase de sondage et les délais de sondage sont très courts.

Le résultat obtenu correspond au modèle précédemment montré par l'équation III.2 et III.4. Cependant, quand les valeurs estimées de la BPD sont plus grandes que 2 Mb/s, TOPP converge lentement par rapport à SLoPS et SLOT. Dans la phase de sondage de la technique TOPP à chaque itération le  $R_{min}$  est augmenté de  $\Delta R_{in}$ , ce dernier est choisi petit pour des raisons de précision  $\Delta R_{in} = 0,1 \text{ Mb/s}$ . Par conséquent, si les valeurs de la BPD à estimer sont près de  $R_{max}$  TOPP a besoin d'un nombre élevé d'itérations pour détecter la valeur de la BPD. Ainsi, TOPP nécessite un délai de sondage très long pour estimer la valeur de la BPD.

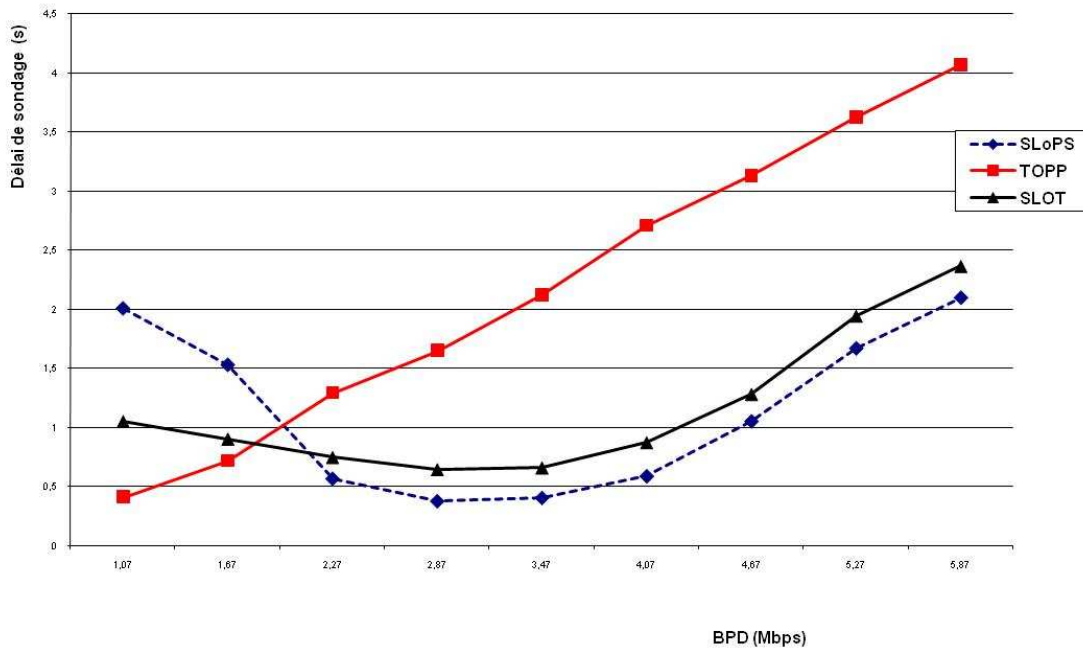


Figure.III.3 : L'évolution des délais de sondage en fonction des valeurs estimées de BPD

En outre, la technique de SLoPS nécessite un délai de sondage long quand les valeurs de la BPD estimées sont proches de l'une des deux extrémités  $R_{min}$  ou  $R_{max}$  de l'intervalle de recherche initial. Cependant les délais de sondage diminuent et prennent des valeurs optimales (minimales) dans les cas où les valeurs de la BPD se rapprochent du milieu de l'intervalle initial de recherche  $(R_{min} \text{ ou } R_{max})/2$ . Ce comportement est dû à la stratégie de recherche dichotomique utilisée par SLoPS dans la phase de sondage. Néanmoins, en général les délais de sondage de SLoPS demeurent nettement inférieurs à ceux de la technique TOPP, en particulier quand les valeurs de la BPD sont proches du  $R_{max}$ .

Lorsque les valeurs de la BPD sont proches de  $R_{min}$ , les délais de sondages de SLOT sont plus courts que ceux de SLoPS et un peu supérieurs à ceux de TOPP. Ceci a lieu pendant une courte période dans le cas où les valeurs de la BPD sont très proches de  $R_{min}$ . Pour le reste des valeurs de la BPD les délais de sondages de SLOT sont proches à ceux de SLoPS mais beaucoup plus faibles que ceux de TOPP. Cela est dû de la stratégie de recherche dichotomique adoptée par la technique SLOT dans la première étape de la phase de sondage, qui entraîne l'accélération de la recherche de la BPD, ce qui rend la technique SLOT plus rapide que TOPP.

## a) Précision

Les précisions moyennes des techniques SLoPS, TOPP et SLOT sont calculée comme suit :

$$\hat{P}_{\text{slops}} = \frac{\sum_{s=1}^5 P_{\text{slops}}^s}{5}, \quad \hat{P}_{\text{topp}} = \frac{\sum_{s=1}^5 P_{\text{topp}}^s}{5}, \quad \hat{P}_{\text{slot}} = \frac{\sum_{s=1}^5 P_{\text{slot}}^s}{5}$$

Le Tableau III.6 montre la valeur de la BPD estimée et la précision moyenne correspondante pour chaque débit de *Trafic Concurrent*.

<i>Trafic Concurrent</i> (Mb/s)	SLoPS		TOPP		SLOT	
	$[\widehat{BPD}_{\min}, \widehat{BPD}_{\max}]$ (Mb/s)	$\hat{P}_{\text{slops}}$ (Mb/s)	$\widehat{BPD}_{\text{Topp}}$ (Mb/s)	$\hat{P}_{\text{topp}}$ (Mb/s)	$\widehat{BPD}_{\text{Slot}}$ (Mb/s)	$\hat{P}_{\text{slot}}$ (Mb/s)
0	[4.72, 5.84]	1.12	5.53	0.512	5.78	0.225
2	[2.98, 3.56]	0.58	3.37	0.32	3.47	0.13
3	[2.09, 2.43]	0.34	2.26	0.125	2.24	0.125
4	[1.07, 2.02]	0.93	1.75	0.12	1.87	0.1

Tableau.III.6 : Résultats de la simulation : Les précisions de SLoPS, TOPP et SLOT

Les courbes de la Figure III.4 montrent l'évolution de la précision pour chaque technique en fonction des valeurs de la BPD estimées. Le comportement de la technique SLoPS est semblable au cas du délai de sondage, elle donne les meilleurs résultats au milieu de l'intervalle initial de recherche ( $R_{\min}$  ou  $R_{\max}$ )/2 par rapport aux extrémités de l'intervalle ( $R_{\min}$  et  $R_{\max}$ ). Cependant, SLoPS est moins précise par rapport aux techniques TOPP et SLOT car le résultat est obtenu sous forme d'intervalle.

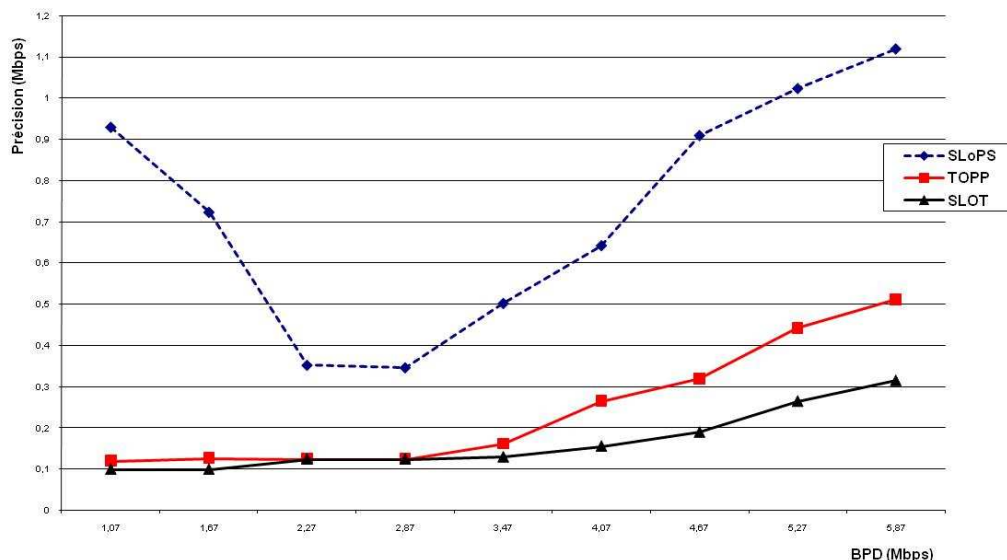


Figure.III.4 : L'évolution de la précision en fonction des valeurs estimées de la BPD

La technique TOPP donne des estimations très précises des valeurs de la BPD quand ces dernières sont inférieures à 3.5 Mb/s. Autrement, lorsque les valeurs de la BPD sont plus grandes que 3.5 Mb/s les valeurs moyennes des erreurs d'estimation augmentent avec les valeurs de la BPD. Ainsi, les erreurs d'estimation de la BPD sont importantes quand les valeurs de BPD sont proches de  $R_{max}$ . D'autre part, la technique SLOT possède des résultats d'estimation plus précis que TOPP et SLoPS, en particulier quand les valeurs de la BPD convergent vers  $R_{max}$ . Cela est à cause des petites valeurs de  $\Delta R_{in}$  qui sont employées dans la deuxième étape de SLOT.

La Figure III.4 montre que la technique SLOT possède les meilleures précisions dans tous les scénarios et les différents cas d'évaluations.

### III.1.5 Limites et critiques de la technique SLOT

Nous rappelons que les techniques que nous avons étudiées dans ce chapitre sont des techniques actives et demeurent intrusives. Ainsi, elles consomment une partie de la BPD que nous mesurons. En outre, dans la première étape de la phase de sondage de SLOT nous calculons les OWDs des paquets. Ces derniers nécessitent une synchronisation des horloges des nœuds ce qui rend leur mise en œuvre difficile dans les réseaux Ad Hoc réels. Ainsi, la détection des changements de ces OWDs nécessite des statistiques lourdes (Section II.1.4.1.b). Ces inconvénients sont l'héritage direct de l'utilisation de SLoPS.

Alors nous avons décidé d'utiliser une autre technique moins intrusive et ne nécessite pas la synchronisation des nœuds à la place de la technique SLoPS. Ainsi, nous avons développé une nouvelle technique appelée TOPP-NET (Train Of Packet Pair Non-invasive Estimation Technique). Dans cette technique nous injectons moins de trafic de sondage dans le réseau, en plus nous avons remplacé le calcul des OWDs par le calcul des RTT.

## III.2 TOPP-NET (Train Of Packet Pair Non-invasive Estimation Technique)

### III.2.1 Introduction

Malgré les performances que possède la technique SLOT, elle n'échappe pas aux critiques citées précédemment et qui sont liées aux synchronisations des nœuds et à l'aspect intrusif de cette technique. Pour pallier à certains de ces inconvénients, nous avons introduit des améliorations dans la technique SLOT. Ces améliorations consistent à modifier la phase de sondage en utilisant une autre technique non intrusive (non intrusive) et sans nécessité d'aucune synchronisation entre les nœuds. Ces changements nous ont permis de passer à l'expérimentation et à l'implémentation de l'estimation de la BPD avec des nœuds réels.

Différentes techniques ont été proposées, mais les plus répandues sont ceux qui utilisent la mesure des RTT. L'avantage des RTT est qu'il est calculé dans le même nœud source et nous n'avons pas besoins de synchronisation entre les nœuds. Pour remplacer la première étape de la phase de sondage de SLOT nous avons choisi la technique NIMBE (Non Invasive MANET Bandwidth Estimator) [Chanet 2006]. Pour éviter d'injecter trop de trafics de sondage, cette technique utilise une modélisation purement mathématique pour estimer la BPD en calculons le RTT d'un paquet de sondage.

Dans la section suivante nous présentons en détail la technique NIMBE. Ainsi, nous présentons notre deuxième contribution qui consiste le développement d'une nouvelle technique nommée TOPP-NET. Cette technique est le résultat du remplacement de la première étape de la phase de sondage de la technique SLOT par la technique NIMBE.

### III.2.2 La technique NIMBE: Non Invasive Manet Bandwidth Estimation

#### III.2.2.1 Principe

La technique NIMBE estime la BPD à partir de l'observation des temps d'aller-retour des paquets entre deux nœuds, c'est-à-dire les RTT, elle est proposée par [Chanet 2006] en 2006. NIMBE est considérée comme non invasive car elle s'appuie sur les paquets de contrôle du protocole du routage pour déterminer les RTT. Elle est donc particulièrement adaptée aux réseaux sans fil qui doivent optimiser l'usage de la bande passante.

Dans la suite de cette section, nous explicitons l'utilisation des RTT, puis nous présentons le fonctionnement de la technique NIMBE.

#### III.2.2.2 Mesure et Filtrage des RTT

Le paramètre RTT est le temps mis par un paquet pour aller de la source à la destination et pour revenir à la source (Figure I.8). L'avantage de ce paramètre est principalement la possibilité de l'utiliser dans des réseaux non synchronisés temporellement. En effet, les mesures de temps sont effectuées sur le même nœud. Pour obtenir une valeur de RTT, le nœud source envoie un paquet en sauvegardant l'instant d'envoi  $t_{Snd}$ . Le nœud destination répond en faisant un écho du paquet original. Ainsi, la source sauvegarde l'instant d'arrivée  $t_{Rcv}$  du paquet écho. Les instants d'envoi et d'arrivée permettent à la source de calculer la valeur de RTT :  $RTT = t_{Rcv} - t_{Snd}$ . Le calcul du RTT peut se faire entre deux nœuds voisins, mais peut également se faire entre des nœuds distants de plusieurs sauts.

La Figure III.5 montre les résultats de calcul des RTT d'une expérimentation effectuée dans [Chanet 2006]. La source et la destination sont deux ordinateurs type PC sous Windows XP équipés de carte Wi-Fi IEEE802.11b. La source calcule les RTT en envoyant un flux de 1000 paquets de sondage suivant une fréquence de 4 paquets par seconde. Les paquets sont de taille fixe ( $L = 84$  octets).

Nous remarquons que la Figure III.5 montre les mesures bruitées des RTT, bien qu'il n'y ait aucun trafic entre les deux nœuds, excepté celui pour la mesure des RTT. Dans ces conditions, s'il existe un *Trafic Concurrent* entre les deux nœuds, les mesures deviennent alors considérablement parasitées. Par conséquence, l'exploitation de ces mesures nécessite un filtrage préalable.

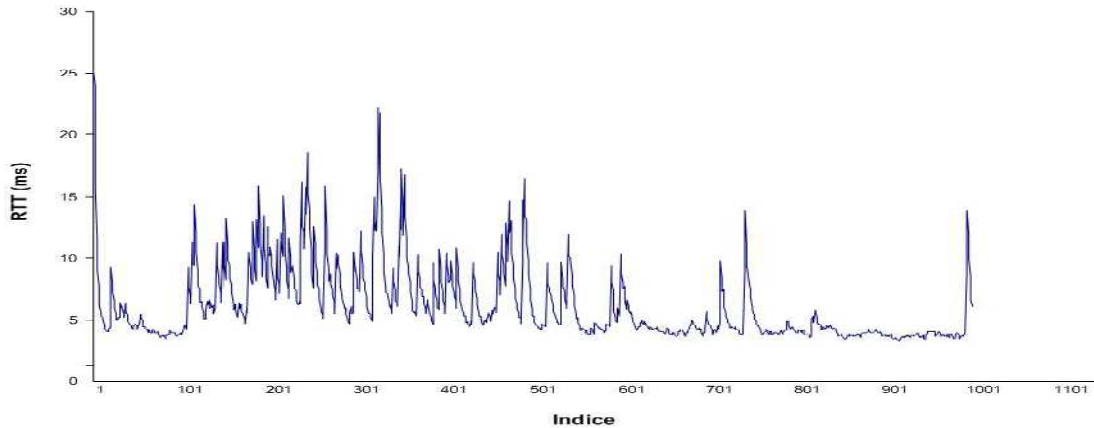


Figure.III.5 : Un exemple de mesure de RTT [Chanet 2006]

Beaucoup de techniques de filtrage ont été implémentées pour les RTT, mais celle qui semble donner les meilleurs résultats est l'utilisation d'un filtre EWMA (Exponentially Weighted Moving Average) [Amamra 2004, Kim 2001]. Dans le chapitre 4 nous présenterons la technique de filtrage intitulée "*Zone-Filter*" que nous avons développée en se basant sur des méthodes statistiques et le filtre EWMA. Nous nous contentons ici de montrer un filtrage simple en utilisant le filtre EWMA, ce filtre est explicité par l'équation III.29 :

$$\overline{RTT}_k = \lambda \overline{RTT}_{k-1} + (1 - \lambda) RTT_k \quad (\text{III. 29})$$

Où  $RTT_k$  est la valeur de RTT calculée à l'instant  $k$ ,  $\overline{RTT}_k$  est la valeur filtrée de RTT à l'instant  $k$  (et  $\overline{RTT}_{k-1}$  à l'instant précédent  $k-1$ ) et  $\lambda \in [0 ; 1]$  est le gain du filtre. Si  $\lambda$  est proche de 1 le filtre est stable. Par conséquence, les valeurs des RTT calculées nouvellement ont peu d'influence sur les valeurs filtrées. En revanche, si  $\lambda$  est proche de 0, le filtre est agile ou réactif et les nouvelles valeurs des RTT influent fortement la valeur filtrée. NIMBE utilise la mesure de  $\overline{RTT}_k$  pour estimer la BPD.

### III.2.2.3 L'estimation de la BPD avec NIMBE

La technique NIMBE est définie par l'équation II.30 proposée par [Chanet 2006]. Cette formulation est basée sur le modèle mathématique de [Legout 2000, Vicisano 1998]. NIMBE détermine la bande passante disponible  $\overline{BPD}_k$  à l'instant  $k$  en fonction des mesures de  $\overline{RTT}_k$  et la taille du paquet  $L$ .

$$\overline{BPD}_k = BPU_{max} \left( 1 - \frac{1}{\exp\left(\frac{2 * L}{\overline{RTT}_k - RTT_{min}}\right)^2} \right) \quad (III. 30)$$

Où  $BPU_{max}$  est la valeur maximale de la bande passante utile du réseau (Section I.2.1.2), elle dépend de la technologie utilisée (par exemple 5,7 Mb/s pour un médium IEEE 802.11b), le paramètre  $L$  correspond à la taille des paquets utilisés pour la mesure et  $RTT_{min}$  est la valeur de RTT minimale du lien lorsqu'il n'y a aucun trafic. Si la valeur  $BPU_{max}$  est inconnue, l'estimateur peut calculer en pourcentage de la bande passante totale disponible en fixant  $BPU_{max} = 100$ . La Figure III.6 montre l'estimation de la BPD obtenue avec NIMBE et le reflet des mesures de RTT correspondantes.

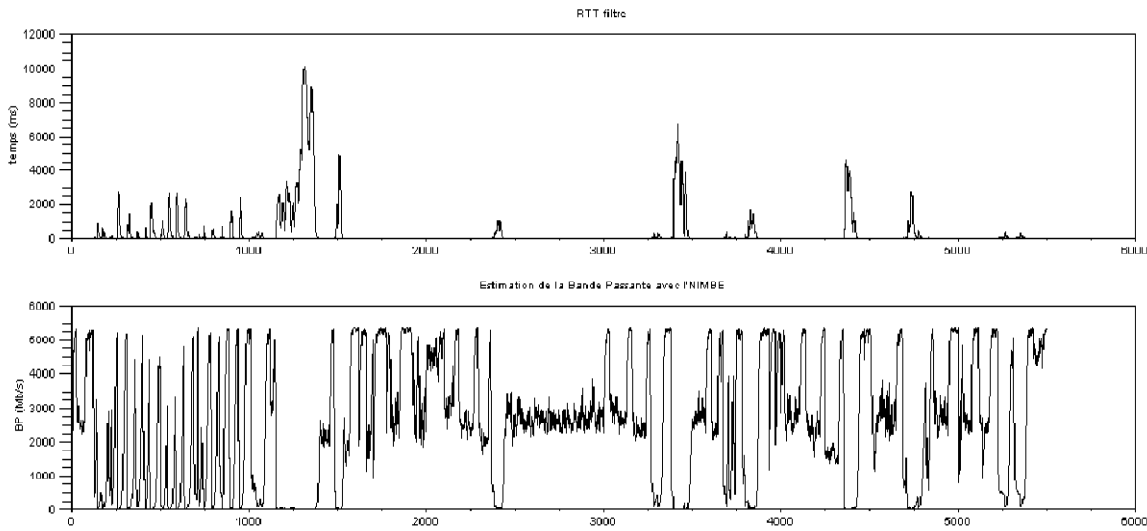


Figure.III.6 : Les résultats de la technique NIMBE [Chanet 2006]

La première courbe de la Figure III.6 montre le résultat du filtrage des mesures de RTT (les valeurs de  $\overline{RTT}_k$ ), la seconde courbe représente l'estimation de la BPD correspondante en utilisant NIMBE. Nous remarquons que les estimations de la BPD réagissent aux variations des valeurs mesurées des RTT. Nombreux sont les avantages de NIMBE parmi les quels nous citons :

- La première estimation de NIBME peut être générée après l'envoi d'un flux de paquets de sondage de taille moyenne (environ 10 paquets).
- A l'exception de la première estimation, NIMBE n'a besoins que d'une seule valeur de RTT d'un seul paquet de sondage pour estimer la BPD. Ce qui rend cette technique non intrusive par rapport aux autres techniques dans la littérature.

- Les estimations générées par NIMBE dépendent des estimations précédentes grâce à l'effet de mémoire des filtres EWMA utilisés pour filtrer les valeurs des RTT. Cette dépendance est réaliste dans les changements des valeurs de la BPD.

Dans les sections suivantes nous présentons notre travail de développement d'une nouvelle technique d'estimation intitulée TOPP-NET (Train Of Packet Paire Non Intrusive Estimation Technique). Cette technique est une amélioration de la technique SLOT que nous avons présenté dans la première partie de ce chapitre. Cette amélioration consiste à remplacer la stratégie de SLoPS par la technique NIMBE dans la première étape de la phase sondage de SLOT.

Ce remplacement vient pour pallier aux problèmes cités précédemment. Dont le plus important est la synchronisation et le nombre de paquets nécessaire pour l'estimation de la BPD.

### III.2.3 Contribution : La technique TOPP-NET

#### III.2.3.1 Motivations

La technique SLoPS surveille les variations des OWDs pour estimer la BPD. La mesure des OWDs exige la synchronisation entre les nœuds sans fil. L'environnement de simulation NS-2 nous permet de maintenir une horloge commune entre les nœuds (ce qui simplifie le calcul des OWDs). Néanmoins, dans la réalité les horloges des nœuds sans fil sont asynchrones. La solution de l'utilisation d'un GPS pour synchroniser les nœuds exige un coût élevé. Ainsi, l'utilisation de NIMBE à la place de SLoPS nous permet de se décharger du problème de la synchronisation des nœuds. En effet le RTT ne nécessite pas d'avoir un réseau synchronisé parce que toutes les mesures sont effectuées par le même nœud.

L'utilisation de NIMBE est aussi rentable de point de vue ne nombre de paquets de sondage nécessaire à l'estimation de la BPD dans la première étape dans la technique SLOT. Tandis que le nombre de trains de paquets de sondage dans SLoPS dépend de la valeur de la résolution  $\theta$  fixée à l'avance, NIMBE n'a besoin qu'un seul train de paquets de sondage pour estimer la BPD. Ce mode de fonctionnement rend SLoPS intrusive par rapport à NIMBE (nous avons moins de pollution radio pour estimer la BPD).

#### III.2.3.2 Algorithme de TOPP-NET

Le déroulement de la phase de sondage de la technique TOPP-NET est montré par la Figure III.7. La phase de sondage est composée de deux étapes, dans la première étape consiste nous envoyons un flux de M (M=2 trains) trains de paquets, chaque train est composé de K (K=10 paquets) paquets de même taille L (L= 2200 octets). Puis nous calculons le RTT de chaque paquet. La fréquence d'envoi des paquets d'un même train est de  $F = \frac{1}{T_{in}}$ . La valeur de  $T_{in}$  est choisie la plus grande possible (en rapport avec les valeurs préfixées de  $\tau$  et



K) de tel façon nous évitons l'interférence entre deux mesures RTT ( $T_{in} = 12\text{ ms}$ ). En utilisant la technique NIMBE nous estimons la valeur de  $BPD_k$  pour chaque mesure  $RTT_k$  correspondante. Ensuite, nous calculons les valeurs de  $BPD_{min}$  et  $BPD_{max}$  pour la totalité du flux en utilisant le système d'équation suivant :

$$\begin{cases} BPD_{max} = \frac{1}{M} \sum_{l=1}^M \text{Max}_l(BPD_1^l, \dots, BPD_K^l) \\ BPD_{min} = \frac{1}{M} \sum_{l=1}^M \text{Min}_l(BPD_1^l, \dots, BPD_K^l) \end{cases} \quad (\text{III. 31})$$

Dans la deuxième étape, la technique TOPP-NET utilise l'intervalle  $[BPD_{min}, BPD_{max}]$  en tant que intervalle de départ pour estimer la BPD en utilisant la stratégie de sondage linéaire de la technique TOPP.

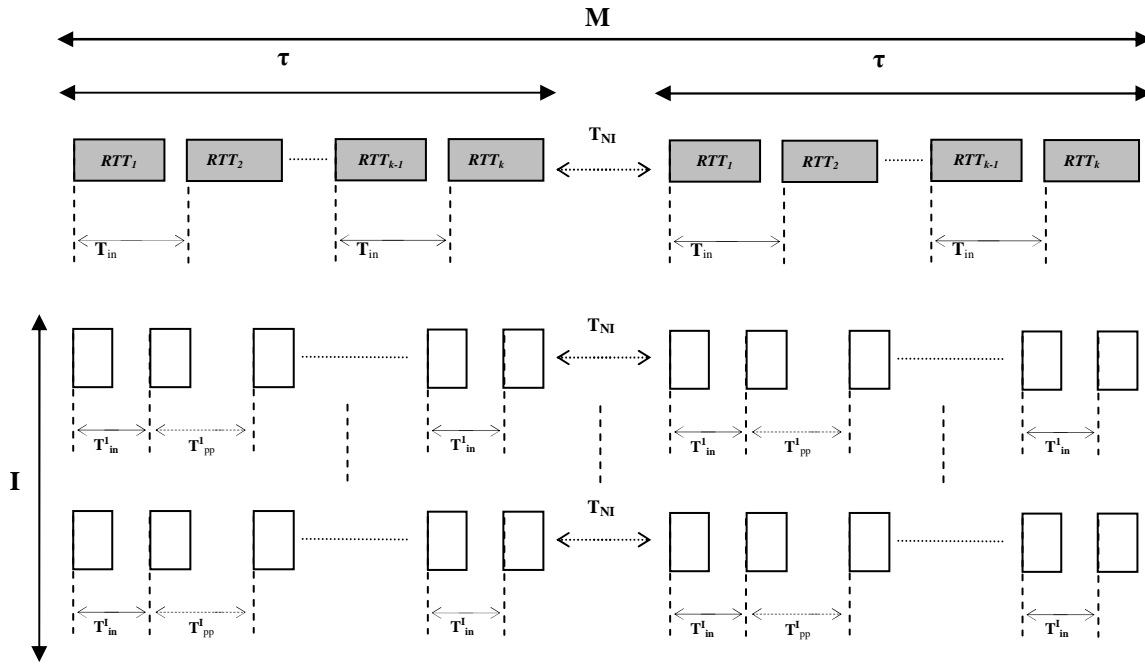


Figure.III.7 : Le modèle de sondage dans la technique TOPP-NET.  
(Une seule itération dans la première étape de la phase de sondage)

Nous gardons le même principe en ce qui concerne le délai inter-trains  $T_{NI}$  utilisé précédemment ( $T_{NI} = 120\text{ ms}$ ). Nous pouvons déduire le nombre maximum d'itérations de la technique TOPP-NET de la façon suivante :

$$I = \left( \frac{BPD_{max} - BPD_{min}}{\Delta R_{in}} \right) + 1 \quad (\text{III. 32})$$

Où le paramètre  $\Delta R_{in}$  est le taux d'augmentation linéaire du débit d'envoi à chaque itération dans la deuxième étape (c'est un paramètre de TOPP). La durée d'exécution de la première étape est plus rapide que celui dans SLOT, car elle envoie un seul flux pour estimer l'intervalle de variation de la BPD. De plus, cet intervalle est de taille plus petite que celle de l'intervalle résultats de la première étape de SLOT. Car  $[BPD_{min}, BPD_{max}]$  représente les variations possibles de la BPD d'une même série de mesures successives. Ce qui nous permet d'avoir des résultats finaux plus rapides et plus précis.

Comme la deuxième étape qui donne l'estimation finale de la BPD, sa détection est similaire que celle dans SLOT et TOPP. Ainsi :

$$BPD_{Topp-net} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \frac{(R_{in}^I + R_{out}^I)}{2} \quad (III. 33)$$

### III.2.3.3 Précision et délai de sondage dans TOPP-NET

Le délai de sondage de la technique TOPP-NET dépend principalement de la durée  $\tau$  du train et du nombre d'itérations de la phase de sondage. Ainsi, le délai de sondage est exprimé par l'équation (III.34) :

$$D_{Topp-net} = [\tau M + T_{NI} (M - 1)] (I + 1) \quad (III. 34)$$

Si nous considérons la taille  $\Omega$  de l'intervalle  $[BPD_{min}, BPD_{max}]$  tel que :

$$\Omega = BPD_{max} - BPD_{min} \quad (III. 35)$$

Par substitution de l'équation (III.32) dans (III.34) :

$$D_{Topp-net} = [\tau M + T_{NI} (M - 1)] \left( \frac{\Omega}{\Delta R_{in}} + 1 \right) \quad (III. 36)$$

Notons que  $D_{Topp-net}$  dépend du rapport  $\frac{\Omega}{\Delta R_{in}}$  puisque la première partie est constante. La taille  $\Omega$  de l'intervalle  $[BPD_{min}, BPD_{max}]$  est logiquement plus petite que celui de l'intervalle généré dans SLOT. Premièrement, du fait qu'il représente des variations de la BPD d'une même série de mesures successives. Deuxièmement, puisqu'il est majoré par la  $BPU_{max}$ . Cette dernière dépend du type du réseau et qui est inférieure à sa capacité théorique (pour IEEE 802.11b la capacité théorique est 11Mb/s et  $BPU_{max} = 5.8 Mb/s$ ). A partir de l'équation III.30 nous pouvons constater que l'intervalle est aussi minoré par la valeur de la BPD minimale qui correspond à  $RTT_{min}$ . Ces limitations rendent les délais de sondage de la technique TOPP-NET mathématiquement inférieur que celui de SLOT

Comme la taille de l'intervalle du départ de la deuxième phase est petite nous donne la possibilité de donner des valeurs encore plus petites de  $\Delta R_{in}$ . Cette dernière détermine la précision  $P_{\text{Topp-net}}$  de la technique TOPP-NET, qui est traduite par l'équation suivante :

$$P_{\text{Topp-net}} = \frac{[E(R_{in}) + E(R_{out}) + \Delta R_{in}]}{3} \quad (\text{III. 37})$$

La détection et le calcul de la valeur de la BPD ainsi que le calcul de la précision dans TOPP-NET sont de la même façon que dans la technique TOPP. Puisque cette dernière représente la deuxième partie de la phase de sondage de TOPP-NET.

Pour évaluer les performances de la technique TOPP-NET de point de vue précision et délais de sondage nous avons développé le programme de TOPP-NET en C++ sous Windows. Puis des tests sont effectués en utilisant des PC équipés avec des cartes Wi-Fi. Maintenant nous présentons la structure et le fonctionnement de notre programme TOPP-NET.

### III.2.4 Implementation de TOPP-NET

TOPP-NET est implémenté en langage C++/Windows en utilisant les sockets UDP/IP. Pour estimer la BPD, le programme de TOPP-NET doit être installé dans tous les nœuds du réseau sans fil. Le programme TOPP-NET peut être exécuté en arrière-plan en tâche de fond en tant que processus démon. L'objectif de ce type de fonctionnement est de ne pas perturber l'exécution des autres programmes en cours et de répondre aux requêtes des programmes qui ont besoins des mesures de TOPP-NET. Il peut être employé comme module d'une application quelconque, ayant besoin de l'estimation de la BPD. Aussi, il peut être utilisé comme module dans un protocole communication spécifique comme CIVIC [DIAO 2008]. Le programme TOPP-NET se compose de deux processus (Figure III.8).

Le processus principal INIT qui lance l'estimation de la BPD. Le processus MSRD fils de l'INIT, pour recevoir les paquets de sondage du nœud source désirant mesurer la BPD. Ces deux processus sont détaillés dans les paragraphes suivants :

#### a) INIT Process

Le processus INIT est exécuté lorsque le nœud joue le rôle de nœud source qui désire estimer la BPD avec un nœud destination. Au début, le processus INIT attend une requête externe pour estimer la BPD (une application temps réel ou un protocole de routage spécifique...). Le processus INIT lance l'estimation de la BPD par l'envoi d'un flux de paquets de sondage à un autre nœud destination du réseau sans fil. Le processus INIT représente le cœur de la technique TOPP-NET, il contient les principales procédures de la technique.

### b) MSRD Process

Le processus MSRD est exécuté dans le cas où le nœud joue le rôle de nœud destination recevant les paquets de sondage du nœud source. Le processus MSRD est créé par le processus INIT local avec la commande FORK. MSRD attend la réception des paquets de sondage de la part du processus INIT d'un nœud source et répond avec des paquets échos où par le débit mesuré afin de permettre au processus INIT du nœud source d'estimer la BPD. La Figure III.8 résume l'architecture et le fonctionnement de la technique TOPP-NET.

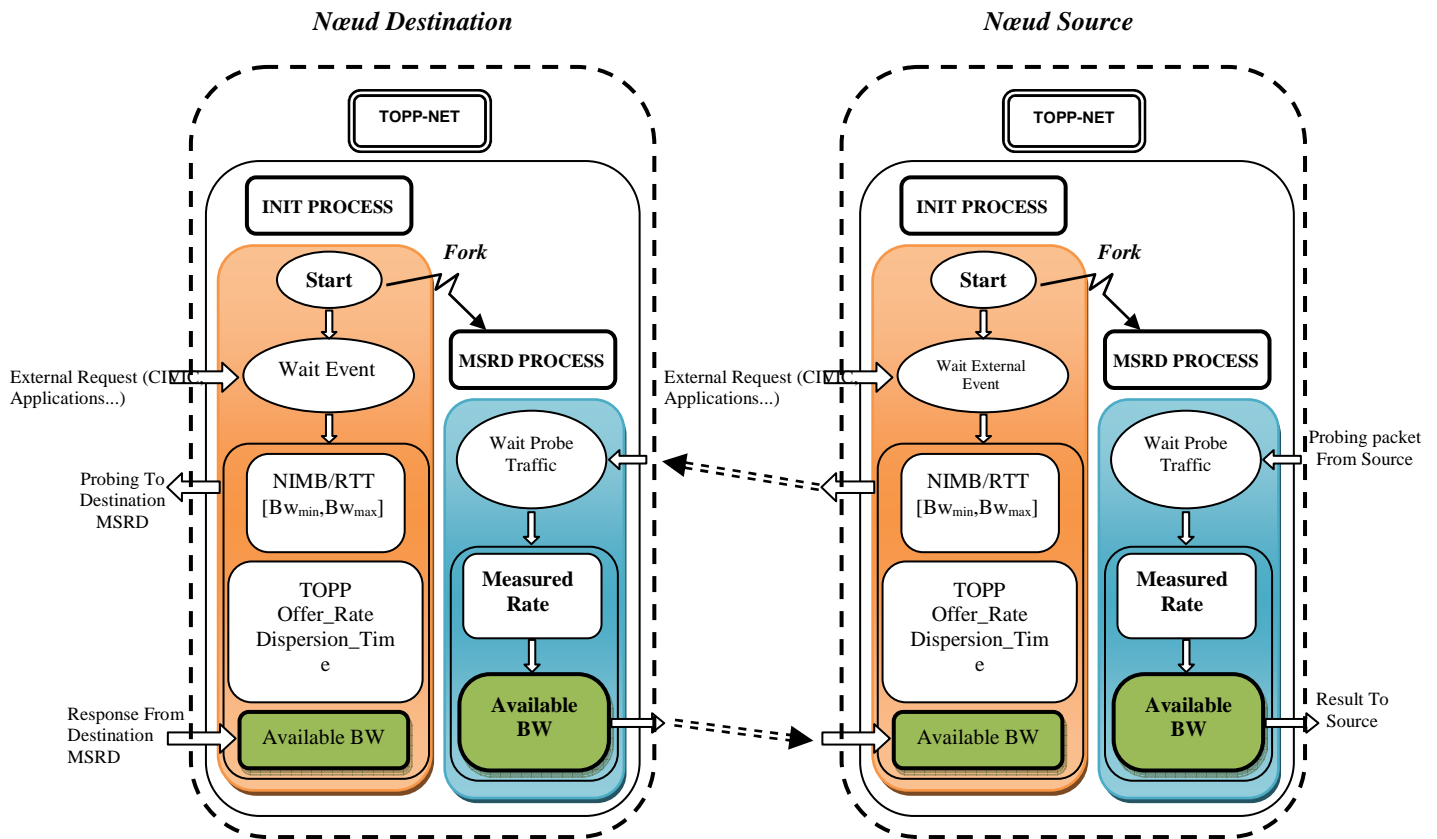


Figure.III.8 : Les processus INIT et MSRD du programme TOPP-NET

### III.2.5 Evaluation de la précision et du délai de sondage dans TOPP-NET

Nous avons choisi de comparer le délai de sondage et la précision de la technique TOPP-NET à ceux de la technique SLOT. Le seul obstacle est que nous avons implémenté SLOT sous NS-2 et nous ne l'avons pas implémenté dans un réseau réel à cause du calcul des OWDs. En revanche, l'implémentation de TOPP-NET est possible grâce à l'utilisation des RTT.

Malgré la différence qui existe entre un programme qui s'exécute sous un environnement de simulation et un autre qui s'exécute dans un environnement réel, nous avons

décidé de monter des scénarios d'expérimentation réels en utilisant TOPP-NET avec les mêmes paramètres de simulation de la technique SLOT. Ainsi, les résultats de cette expérimentation sont comparés à ceux de la simulation de SLOT de la première partie. Nous décrivons le détail de cette expérimentation et ces paramètres dans le paragraphe suivant.

### III.2.5.1 Expérimentation

Pour évaluer les performances de la technique TOPP-NET nous utilisons quatre ordinateurs personnels ( $PC_1$ ,  $PC_2$ ,  $PC_3$  et  $PC_4$ ) fonctionnant sous Windows-XP et ayant la carte sans fil **ZyAIR** Wi-Fi IEEE.802.b La capacité théorique de réseau est 11 Mbps. Nous employons un réseau Ad-Hoc avec un SSID "TOPP-NET". Les PCS sont situés dans un espace bureau d'une dimension de 7m\*7m. Comme le montre la Figure III.9, le nœud  $PC_3$  envoie à  $PC_4$  un *Trafic Concurrent* avec des débits variables : 0, 2, 3 et 4 Mb/s. Le nœud  $PC_1$  envoie un trafic de sondage au nœud  $PC_2$  pour estimer la BPD.

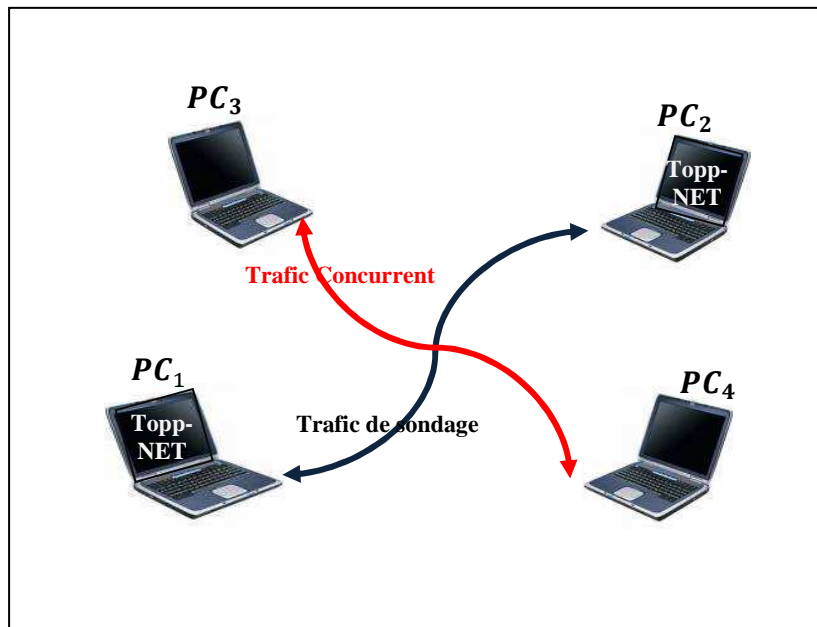


Figure.III.9 : La topologie de l'expérimentation.

- $PC_1 - PC_2$  : Trafic de sondage.
- $PC_3 - PC_4$  : Trafic Concurrent.

L'expérimentation est composée de quatre scénarios (Sc1, Sc2, Sc3, Sc4), où chaque débit du *Trafic Concurrent* correspond à un scénario. Chaque scénario est exécuté cinq fois. Les résultats de la BPD, de la précision et du délai de sondage représentent les moyennes des résultats pour chaque scénario. Ainsi, nous calculons ces moyennes comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} \widehat{BPD}_{\text{Topp-net}} = \frac{\sum_{s=1}^5 BPD_{\text{Topp-net}}^s}{5} \\ \widehat{P}_{\text{Topp-net}} = \frac{\sum_{s=1}^5 P_{\text{Topp-net}}^s}{5} \\ \widehat{D}_{\text{Topp-net}} = \frac{\sum_{s=1}^5 D_{\text{Topp-net}}^s}{5} \end{array} \right.$$

Les paramètres de la technique TOPP-NET sont présentés dans le Tableau (III.). Ainsi Pour pouvoir comparer TOPP-NET avec SLOT, les scénarios de l'expérimentation sont exécutés avec les mêmes paramètres de la simulation (Trafic Concurrent, taille des paquets...). Les paramètres de l'expérimentation sont présentés dans le Tableau (III.)

TOPP-NET	
Paramètres	Valeur
$\Delta R_{in}$	50 Kb/s
K	10
M	2
$T_{in}$	22 ms
$\tau$	120 ms
$T_{NI}$	120ms

Tableau.III.7 : Les paramètres de la technique TOPP-NET

Expérimentation	
Paramètres	Valeur
PC	4
<i>Distance</i>	5~6m
L	2200 octets
<i>Trafic Concurrent</i>	0, 2, 3, 4 Mb/s
<i>Scénarios</i>	4
<i>Exécution</i>	5 fois pour chaque scénario

Tableau.III.8 : Les paramètres de l'expérimentation

Les résultats de cette expérimentation sont enregistrés dans des fichiers .txt puis analysés en utilisant MTALB. Ces résultats seront présentés et commentés dans le paragraphe suivant.

### III.2.5.2 Résultats

Les résultats de l'expérimentation de TOPP-NET sont commentés et comparés à ceux de la simulation de SLOT. Pour cela nous avons utilisé les précédents résultats de la simulation de la précision et du délai de sondage de SLOT.

Les tableaux III.9 et III.10 montrent les résultats des deux techniques. Ces résultats sont traités avec un programme en MATLAB en faisant une interpolation linéaire sur les valeurs des données de chaque tableau. Cette interpolation nous a permis de dessiner les courbes des Figures III.10 et III.11.

#### a) Précision

Le tableau III.9 montre les estimations de la BPD et les précisions moyennes correspondantes pour les techniques SLOT et TOPP-NET. Les courbes de la Figures III.11 montrent l'évolution des précisions moyennes des deux techniques en fonction des estimations de la BPD.

<i>Traffic Concurrent (Mbps)</i>	<b>Simulation</b>		<b>Experimentation</b>	
	<b>SLOT</b>		<b>TOPP-NET</b>	
	$\widehat{BPD}_{Slot}$ (Mb/s)	$\widehat{P}_{Slot}$ (Mb/s)	$\widehat{BPD}_{Topp-net}$ (Mb/s)	$\widehat{P}_{Topp-net}$ (Mb/s)
0	5,78	0,225	5,01	0,080
2	3,47	0,13	3,13	0,110
3	2,24	0,125	2,36	0,117
4	1,87	0,1	1,42	0,120

Tableau.III.9 : Résultats de l'expérimentation : Les précisions de SLOT et TOPP-NET

Nous remarquons que les mesure de TOPP-NET sont moins précises par rapport à SLOT quand les valeurs de la BPD sont inférieures d'environ de 2 Mb/s. Cette imprécision est due aux fluctuations très fortes des valeurs des RTT mesurées, cela est répercuté sur les estimations de la BPD. Par conséquence, l'intervalle des variations de la BPD généré par la première étape de TOPP-NET possède une taille assez grande ce qui diminue la précision de TOPP-NET

Les précisions de TOPP-NET s'améliorent avec l'augmentation des valeurs de la BPD estimées, elles sont proches des précisions de SLOT lorsque les valeurs de la BPD sont comprises entre [2 Mb/s, et 2,5 Mb/s] et nettement meilleures quand les valeurs de la BPD estimées dépassent les 3 Mb/s.

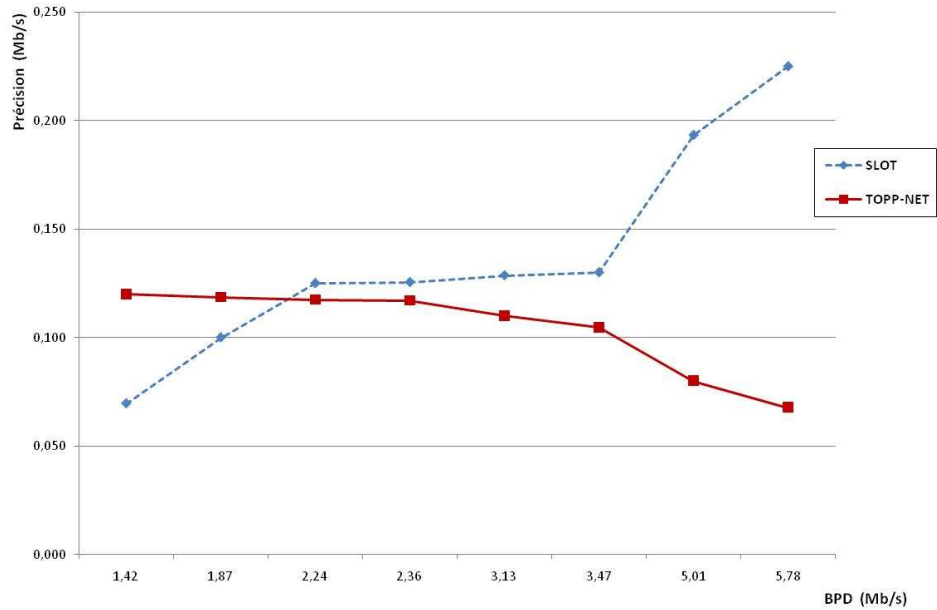


Figure.III. 10 : L'évolution de la précision de SLOT et TOPP-NET

En effet, avec la diminution des débits du *Trafic Concurrent* les mesures des RTT sont de plus en plus précises et donne des estimations de la BPD proches. Ce la génère des intervalles des variations de la BPD de taille plus petite. Par conséquence, les mesures de la BPD dans la deuxième étape de la phase de sondage de TOPP-NET sont plus précises.

Hormis les estimations de la BPD qui sont inférieures de 2 Mb/s, TOPP-NET montre des précisions meilleures par rapport à ceux de SLOT.

#### b) Délai de sondage

Le tableau III.10 montre les estimations de la BPD et les délais de sondage moyens correspondants pour les techniques SLOT et TOPP-NET. Les courbes de la Figures III.11 montrent l'évolution des délais de sondage des deux techniques en fonction des estimations de la BPD.

<i>Trafic Concurrent</i>  (Mbps)	Simulation		Experimentation	
	SLOT		TOPP-NET	
	$\widehat{BPD}_{Slot}$ (Mb/s)	$\widehat{D}_{Slot}$ (s)	$\widehat{BPD}_{Topp-net}$ (Mb/s)	$\widehat{D}_{Topp-net}$ (s)
0	5,78	3,15	5,01	0,63
2	3,47	0,87	3,13	0,78
3	2,24	0,71	2,36	0,70
4	1,87	1,05	1,42	1,30

Tableau.III.10 : Résultats de l'expérimentation : Les délais de sondage SLOT et TOPP-NET



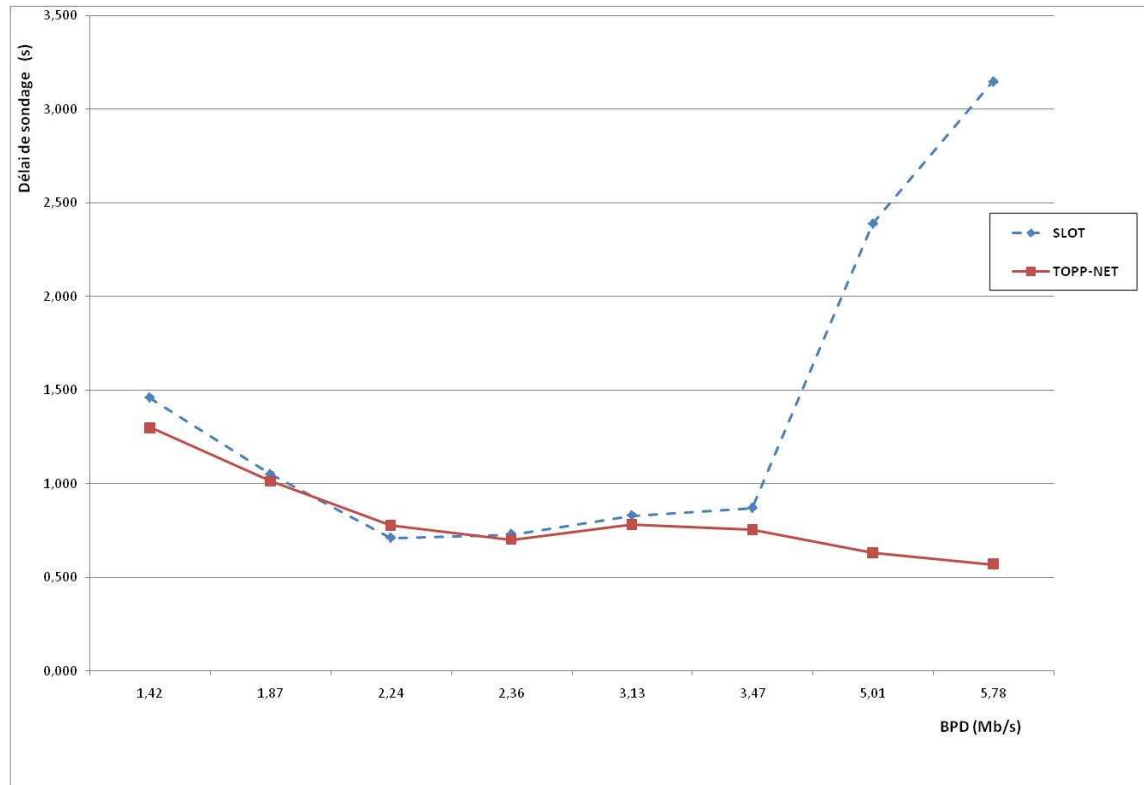


Figure.III.11 : L'évolution du délai de sondage de SLOT et TOPP-NET BPD

En ce qui concerne les délais de sondage, lorsque les valeurs de la BPD sont comprises entre 1 Mb/s et 2 Mb/s TOPP-NET réalise des délais de sondage proches de ceux de SLOT. Cela signifie que les délais de sondage ne sont pas assez améliorés par rapport à ceux de SLOT. Pendant cette période les débits du *Trafic Concurrent* sont compris entre 3Mb/s et 4 Mb/s. Ainsi, pour calculer les RTT les paquets de sondage envoyés par la source sont interférés avec les paquets du *Trafic Concurrent* et arrive à la destination avec un retard, ce retard sera cumulé à celui du retour. Par conséquence, les RTT augmentent et la durée de la première étape de TOPP-NET aussi. En outre, pendant cette période les intervalles des variations de la BPD générés par la première étape de TOPP-NET ont des tailles grandes, ce qui augmente la durée de la recherche de la deuxième étape de TOPP-NET.

Les délais de sondage de TOPP-NET diminuent lorsque les valeurs de la BPD sont comprises entre [2.3 Mb/s et 3.47 Mb/s]. Cependant, ils restent proches de ceux de SLOT. Pendant cette période SLOT réalise ses délais les plus bas, à cause de l'utilisation de la technique SLoPS et l'héritage de l'effet de la stratégie binaire qui réalise des courtes durées dans les valeurs médianes.

Cependant, lorsque les valeurs de la BPD sont comprises entre [3.5 Mb/s et 5,78 Mb/s], les délais de sondage de TOPP-NET sont nettement inférieurs que ceux de SLOT. Pendant cette période, les débits du *Trafic Concurrent* sont très faibles (entre 0 et 2 Mb/s) et les RTT des paquets de sondage sont aussi très faibles. Par conséquence, le délai de la

première étape de la phase de sondage de TOPP-NET est court. En outre, les mesures de la BPD dans cette période sont moins affectées par le *Trafic Concurrent*. Par conséquent, la première étape de TOPP-NET génère des intervalles des variations de la BPD de petites tailles, cela va accélérer la recherche de la BPD dans la deuxième étape.

Finalement nous pouvons dire que dans le cas où le réseau est moins chargé, (les débits du *Trafic Concurrent* sont faibles) TOPP-NET possède des délais de sondage meilleur que ceux de SLOT. C'est le seul cas où TOPP-NET apporte une amélioration du point de vue de délai de sondage.

Malgré ces apports de TOPP-NET par rapport à SLOT, elle reste critiquable par rapport à certaines autres performances, vu le contexte limité dans le quel TOPP-NET été évaluée.

### III.2.5 Limites et critiques de la technique TOPP-NET

Avec TOPP-NET nous diminuons le trafic injecté dans le réseau en utilisant NIMBE. En effet la première étape est réduite à l'envoi d'un seul flux de paquets de sondage pour calculer les RTT. Cela diminue la pollution radio et atténue l'aspect intrusive de la technique SLOT mais il ne le supprime pas. Car TOPP-NET est comme SLOT, les deux utilisent la technique TOPP dans la deuxième étape. Cette dernière injecte du trafic dans le réseau et par conséquent elles sont intrusives.

Aussi, TOPP-NET hérite les hypothèses faites sur les réseaux par les techniques TOPP et NIMBE (la gestion FIFO des files d'attente, la symétrie des chemins aller-retour...). Ce qui rend son utilisation dans un réseau à grand échelle difficile. Elle nécessite d'être comparée aux autres techniques d'estimation pour améliorer ses performances. Ces dernières sont valides dans un contexte limité. La technique TOPP-NET est testée dans une topologie simple avec des nœuds fixes, et avec un *Trafic Concurrent* à débit constant. Mais il est nécessaire d'évaluer la persistance de cette technique à la mobilité des nœuds, aux changements de la charge du *Trafic Concurrent* et dans un réseau multi-sauts avec différents protocoles de routage. Ainsi, la sensibilité de cette technique aux altérations du médium radio et aux pertes de paquets doit être testée.

## III.3 Synthèse

Dans ce chapitre nous avons étudié le mécanisme de sondage pour l'estimation de la BPD pour deux techniques actives : TOPP et SLoPS. Ces techniques emploient deux stratégies différentes de recherches de la BPD, TOPP utilise une stratégie linéaire (incrémentale) et SLoPS utilise une stratégie binaire (dichotomique). Ainsi, nous avons développé une nouvelle technique appelée SLOT, cette technique est aussi active et combine leurs stratégies de sondage.

La technique SLOT constitue notre première contribution principale, c'est une nouvelle technique qui profite des avantages des deux techniques précédentes en combinant leurs stratégies de recherche binaire et linéaire. En effet, nous profitons de la stratégie binaire pour accélérer la recherche et réduire l'intervalle de variation de la BPD en le divisant par deux à chaque itération. En plus nous profitons de la stratégie linéaire pour avoir des résultats d'estimations plus précis en cherchant à détecter la valeur de la BPD dans l'intervalle résultat de la stratégie binaire.

Dans la plupart des cas de la simulation de la technique SLOT montre des délais de sondage inférieurs à ceux de TOPP. En outre, SLOT possède des estimations de la BPD nettement plus précises que celles de SLoPS. Les caractéristiques de la technique SLOT sont prouvées avec le modèle mathématique développé précédemment. En se référant sur les critiques de la technique SLoPS évoquées ci-dessus nous avons pensé d'apporter une réflexion sur la solution de certains problèmes comme l'aspect intrusive et le problème de synchronisation dans le réseau. Nous avons eu l'idée de combiner la technique SLOT avec une autre technique (non-intrusive) NIMBE. Le résultat de cette combinaison est une nouvelle technique appelée TOPP-NET.

En effet, la technique TOPP-NET constitue notre deuxième contribution. Elle est l'amélioration de la technique SLOT en remplaçant sa stratégie binaire par les mesures des RTT d'un seul flux de paquets de sondage et l'estimation de la BPD avec la technique NIMBE. Ce remplacement a apporté des améliorations de point de vue de quantité de données injectée dans le réseau et surtout de point de vue précision délais de sondage. Malgré l'amélioration de la précision avec la technique TOPP-NET, les estimations restent bruitées surtout lorsque les débits du *Trafic Concurrent* sont importants et fluctuent rapidement. Cette imprécision augmente considérablement aux moments où la qualité du médium sans fil se détériore à cause des effets électromagnétiques, ou à cause de la mobilité des nœuds.

Dans le quatrième chapitre nous intéressons au filtrage des estimations de la BPD en utilisant les filtres adaptatifs. Afin d'améliorer les résultats des estimations.



# **Chapitre IV**

## **Filtrage des estimations et Mise en Œuvre de l'estimateur TOPP-NET**

### **Sommaire**

---

#### **IV.1 Filtrage adaptatif des estimations**

- IV.1.1 Les Systèmes de Filtrages Adaptatifs
- IV.1.2 Contribution : Filtrage par Zone
- IV.1.3 Evaluation des filtres Flip-Flop et Zone-Filter

#### **IV.2 Mise en œuvre de l'estimateur de la BPD TOPP-NET**

- IV.2.1 Processus indépendant
- IV.2.2 Protocole d'émission adaptatif
- IV.2.3 Différentiation des Services
- IV.2.4 Le protocole CIVIC (Communication Inter Véhicules Intelligente et

#### **IV.3 Synthèse**

---

Ce chapitre sera consacré à deux points importants de l'estimation de la BPD. Le premier est le filtrage des valeurs estimées générées par les différentes techniques d'estimation de la BPD. Pour cela nous nous sommes focalisés sur les systèmes de filtrage adaptatifs utilisant les filtres de type EWMA (Exponential-Weighted Moving Average). Le deuxième point est la mise en œuvre de l'estimateur TOPP-NET et son rôle dans l'amélioration de la QdS dans les réseaux Ad Hoc. Nous prenons le cas du protocole CIVIC (Communication Inter Véhicules Intelligents et Coopérative) [Hou 2005]. Ce protocole est développé par l'équipe SMIR dans le laboratoire LIMOS. L'objectif de ce protocole est de gérer la communication entre des véhicules tout en garantissant un certain niveau de QdS. Notre objectif est d'intégrer l'estimateur de la BPD dans le protocole CIVIC pour aider le gestionnaire de la bande passante de prendre les bonnes décisions en fonction de la quantité de la BPD.

## **IV.1 Filtrage adaptatif des estimations**

Pendant le processus de sondage, les estimations sont parasitées par les bruits engendrés aux changements des conditions du réseau et aux différents facteurs de perturbation. Ces facteurs sont liés à la topologie dynamique du réseau, à la fragilité du médium (effets Doppler, multi-trajet 'fading', interférences électromagnétiques...) et aux bruits de fond du matériel informatique. Les conséquences de ces phénomènes induisent des erreurs sur les valeurs estimées et présentent des défis additionnels pour fournir des évaluations précises.

Ainsi, pour évaluer précisément les performances du réseau, les mesures doivent être filtrées en utilisant des filtres adaptatifs. Ces derniers nous permettent d'avoir des estimations moins bruitées.

Dans cette partie du quatrième chapitre, nous décrivons quatre systèmes de filtrage adaptatif : le filtre EWMA, le filtre de Stabilité, le filtre d'Erreur et le filtre Flip-Flop [Kim 2001]. Certaines modifications sont apportées sur ce dernier afin d'améliorer sa capacité de filtrage. Ainsi, nous proposons un nouveau filtre nommé Zone-Filter (Filtrage par Zone) [Amamra 2004]. Le but de ce filtre est d'améliorer le processus de filtrage existant en employant un filtrage par zone et un comportement plus progressif que le filtre traditionnel Flip-Flop.

Le filtre Zone-Filter est évalué et comparé au filtre Flip-Flop en utilisant le simulateur des réseaux OPNET [Opnet 2008]. Les résultats sont analysés par MATLAB.

## IV.1.1 Les Systèmes de Filtrages Adaptatifs

### IV.1.1.1 Les Filtres EWMA

Dans le domaine d'estimation des performances réseau, la plupart des filtres adaptatifs utilisent les filtres EWMA (Exponential-Weighted Moving Average) [Lucas 1990]. Le principe des filtres EWMA est de générer une nouvelle estimation filtrée  $EF_t$  en fonction d'une combinaison linéaire entre l'estimation filtrée précédente  $EF_{t-1}$  et l'estimation courante  $E_t$ . EWMA utilise la moyenne mobile pondérée pour lisser les bruits des estimations, la forme générale des EWMA est définie par le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} EF_t = \lambda EF_{t-1} + (1 - \lambda)E_t \\ t = 1, 2, \dots, n \text{ et } 0 < \lambda < 1 \end{cases} \quad (IV.1)$$

Où  $EF_t$  est l'estimation filtrée nouvellement créée,  $EF_{t-1}$  est l'estimation filtrée précédente, et  $E_t$  est l'estimation courante. Le terme  $\lambda$  est appelé *gain*, il détermine la réactivité du filtre et la profondeur de la mémoire du filtre. Si le *gain* est grand, les anciennes estimations seront favorisées et le filtre sera plus stable. En revanche, les filtres à faible *gain* favorisent les estimations courantes et ils ont tendance à être agiles. Ils possèdent une grande réactivité en détectant rapidement les nouveaux changements.

La valeur du gain  $\lambda$  représente la clé et le défis des filtres EWMA. Les problèmes majeurs de ces filtres sont : d'une part, donner une valeur adéquate au gain  $\lambda$  afin d'obtenir des estimations précises correspondant aux véritables fluctuations des valeurs de la BPD. D'autre part, la valeur du gain  $\lambda$  ne devrait pas être fixe pour toutes les estimations, mais elle doit être différente en fonction du taux de bruit contenant dans ces estimations.

Kim [Kim 2001] présente dans ses travaux d'autres filtres basés sur les filtres EWMA, comme le filtre de stabilité, le filtre d'erreur. Et il propose un autre filtre appelé **Flip-Flop**. Ce filtre a montré des meilleures performances que les filtres précédents. La différence majeure entre ces filtres reste dans la manière de choisir le gain  $\lambda$ . Dans les sections suivantes nous présentons tous ces filtres avant de présenter notre nouveau filtre Zone-Filter qui va être comparé au Flip-Flop.

### IV.1.1.2 Le Filtre de Stabilité

Le *Filtre de Stabilité* en anglais *Stability Filter* consiste à calculer la variance des estimations pour changer dynamiquement le gain d'un filtre EWMA. Si les dernières estimations divergent, la valeur du gain augmente et inversement.

$$\begin{cases} EF_t = \alpha_t EF_{t-1} + (1 - \alpha_t)E_t \\ t = 1, 2, \dots, n \text{ et } 0 < \alpha_t < 1 \end{cases} \quad (IV.2)$$

Le *Filtre de Stabilité* amortit les estimations proportionnellement aux variances de leurs valeurs. Cependant, nous employons une mesure de la variance pour changer dynamiquement le gain d'un filtre EWMA (équation IV.2).

L'objectif du *Filtre de Stabilité* est d'atténuer les estimations quand le réseau montre un comportement instable. Lorsque des estimations consécutives divergent, l'instabilité augmente. Cela, à son tour, augmente le gain, ce qui rend le filtre stable. Pour calculer l'instabilité  $U_t$ , nous utilisons un deuxième filtre EWMA :

$$U_t = \beta U_{t-1} + (1 - \beta)|E_t - E_{t-1}| \quad (IV.3)$$

La valeur de  $\beta$  est choisie empiriquement selon le réseau [Kim 2001]. Pour les courbes de la Figure IV.1 la valeur de  $\beta$  est 0,6. Le gain  $\alpha_t$  est égal à :

$$\alpha_t = U_t / U_{max} \quad (IV.4)$$

Où  $U_{max}$  représente la valeur de la plus grande instabilité dans les dix plus récentes estimations. Un exemple de Filtre de Stabilité est montré dans la Figure IV.1. La ligne pointillée montre l'évolution des valeurs des estimations brutes sans filtrage, et la ligne continue montre les valeurs correspondantes de ces estimations filtrées. Le filtre est relativement robuste contre les grands changements des performances réseau, mais les traces des petits changements sont aplaties.

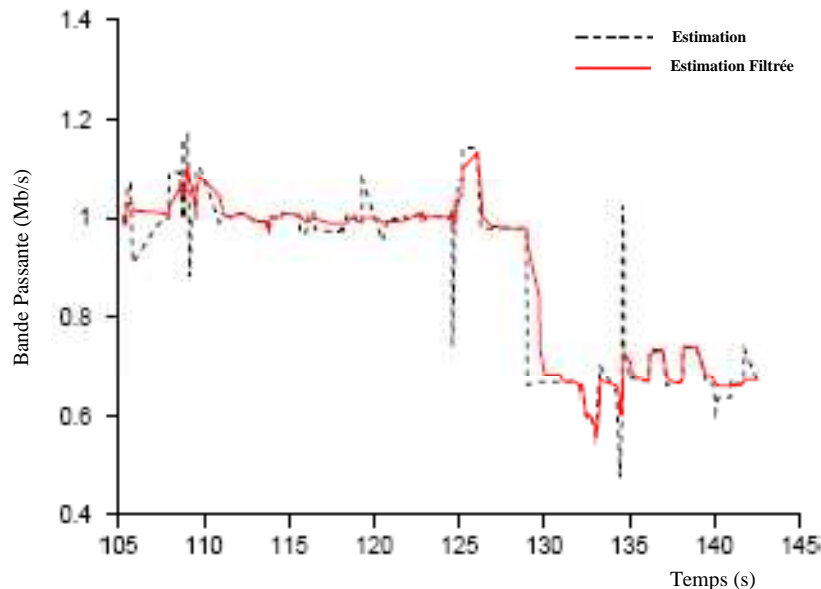


Figure IV.1 : Exemple de Filtre de Stabilité [Kim 2001]



### IV.1.1.3 Le Filtre d'Erreur

Le **Filtre d'Erreur** en anglais (**Error-Based Filter**) suit le même principe que le Filtre de Stabilité. Il prend sa forme générale, mais utilise une approche différente pour l'adaptation de son gain. Plutôt que de changer le gain en fonction de la variance des observations, il tient compte de la différence entre l'estimation filtrée précédente et l'estimation courante. Si l'estimation produite par le Filtre d'Erreur possède un petit écart d'erreur avec les précédentes estimations, le gain prend une grande valeur pour donner plus de poids et favoriser cette estimation. En revanche si l'écart devient grand, la valeur du gain diminue. Néanmoins les estimations produites par ce filtre restent imprécises à cause des valeurs heuristiques choisies initialement pour ce filtre.

Pour une estimation quelconque l'erreur est la différence entre l'estimation précédente et l'estimation actuelle :  $|EF_{t-1} - E_t|$ . Au lieu d'utiliser les valeurs brutes à chaque étape, ces erreurs sont filtrées à l'aide d'un filtre secondaire EWMA. Il joue alors un rôle semblable à celui de  $U_t$  dans le Filtre de Stabilité.

$$\Delta_t = \gamma \Delta_{t-1} + (1 - \gamma) |EF_{t-1} - E_t| \quad (IV.5)$$

Où  $\gamma$  est de 0,6. Cette valeur a été choisie heuristiquement de la même manière que  $\beta$ . Ainsi le gain du Filtre d'Erreur est calculé comme suit :

$$\alpha_t = 1 - \frac{\Delta_t}{\Delta_{max}} \quad (IV.6)$$

Où  $\Delta_{max}$  est calculé de la même manière que  $U_{max}$ . Un exemple de ce filtre est illustré par la Figure IV.2. La ligne pointillée montre l'évolution des valeurs d'estimation non filtrées, et la ligne continue montre les valeurs d'estimation Filtrées. Contrairement au Filtre

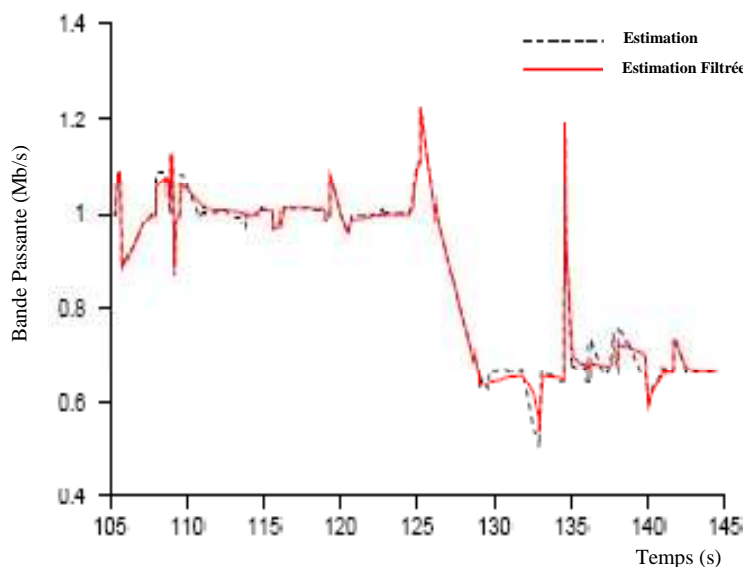


Figure IV.2 : Exemple du Filtre d'Erreur [Kim 2001]

de Stabilité, le Filtre d'Erreur suit rapidement les grandes fluctuations, mais amortie les faibles.

#### IV.1.1.4 Le Filtre Flip-Flop

Le but de cette section est de présenter les principes de base du filtre Flip-Flop ou filtre à Basculer élaboré par [Kim 2001]. Ce filtre est composé de deux filtres EWMA avec deux gains dont les valeurs sont fixes et choisies heuristiquement. Flip-Flop utilise une méthode statistique pour sélectionner le filtre EWMA à utiliser. Pour bien comprendre le fonctionnement du filtre Flip-Flop, dans ce qui suit nous décrivons les techniques statistiques utilisées par ce filtre.

##### a) Le Contrôle Statistique des Processus (CSP)

Les méthodes CSP en anglais *SPC* (*Statistical Process Control*), sont ensemble de méthodes statistiques développées en 1931 par *William Edwards Deming* [Montgomery 2005]. Les CSP sert à anticiper sur les décisions à prendre pour améliorer n'importe quel processus de fabrication industrielle (automobile, métallurgie, ...), au travers de représentations graphiques appelées cartes de contrôle.

Les CSP ont pour mission de déterminer si le processus est sous contrôle ou non. Une analyse plus détaillée des causes des variations permettra d'améliorer ses performances et sa régularité. Les cartes de contrôle sont un outil graphique de visualisation du processus dans le temps et de mise en évidence de sa stabilité "surveillance des causes spéciales".

Une carte de contrôle (Figure IV.3) est un outil se présente comme un graphique dont les points représentent le suivi dans le temps d'une caractéristique du processus dont la valeur centrale (souvent la moyenne) est représentée par une ligne horizontale ainsi que les limites de contrôle supérieure (UCL) et inférieure (LCL) (UCL : Upper Control Limit, LCL : Lower

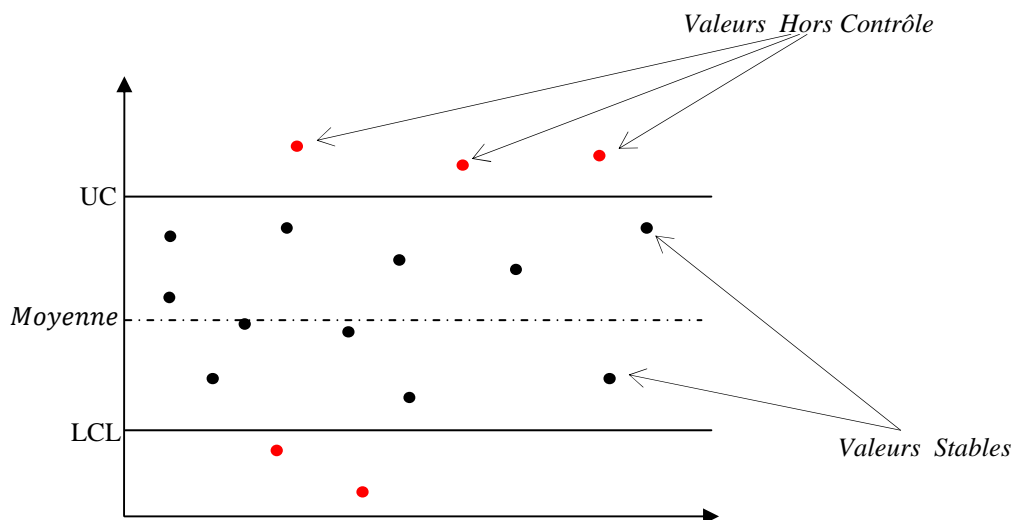


Figure IV.3 : Carte de contrôle de CSP

Control Limit). Ces deux valeurs sont les limites à l'intérieur des quelles le processus est sous contrôle. Les valeurs du processus contrôlé doivent se trouver à l'intérieur de ces limites, sinon ces valeurs sont *Hors Contrôle* et doivent être examinées. Pour déterminer les valeurs de UCL/LCL une règle statistique appelée la règle de 3-Sigma est utilisée.

#### b) La règle 3-sigma

La règle 3-sigma [Montgomery 2005] est parmi les techniques utilisées par CSP. Le point de départ de cette règle est la comparaison entre la moyenne  $\bar{X}$  d'observation et le moyenne  $\mu$  de la population d'un processus donné. Ainsi, les deux limites de contrôle, UCL et LCL sont définies et calculées au moyen de la formule suivante :

$$\begin{cases} UCL = \mu + 3\sigma \\ LCL = \mu - 3\sigma \end{cases} \quad (IV.7)$$

Où  $\sigma$  est l'écart type des valeurs des observations. Le principe de la règle 3-sigma indique qu'un processus ayant une valeur d'observation hors de l'intervalle constitué par les deux limites de contrôle UCL/LCL est considéré comme hors de contrôle (Figure IV.4). La capacité des CSP de fournir la surveillance des processus et la détection du comportement anormal des processus rend les CSP très populaires est utilisables dans plusieurs domaines notamment le filtrage.

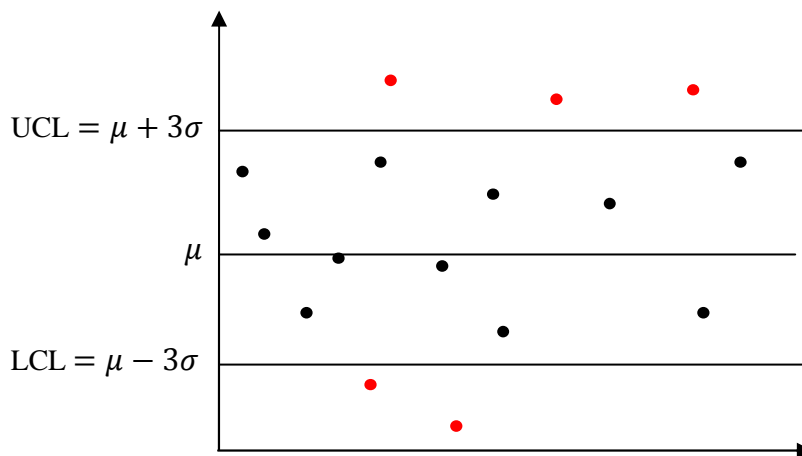


Figure IV.4 : Carte de contrôle de CSP avec les limites de 3-Sigma

Le filtre Flip-Flop utilise les CSP pour contrôler le processus d'estimation de la BPD, nous pouvons surveiller les valeurs d'estimations de la BPD en utilisant la règle 3-Sigma en tant qu'outil de prise de décision pour sélectionner quel filtre EWMA à utiliser pendant le processus de filtrage.

Cependant, employer cette règle dans le domaine des réseaux sans fil pose quelques problèmes. En effet, les caractéristiques d'un réseau et ses évolutions ne sont pas a priori connues à l'avance (les valeurs de la BPD). De ce fait, il ne permet pas de calculer l'écart type des valeurs de la BPD. A tout moment, nous ne connaissons pas non plus la valeur moyenne de toutes les estimations de la BPD. Par conséquence, la moyenne des estimations change avec le temps et les limites de contrôle UCL/LCL sont misent à jour à chaque fois par rapport à la nouvelle moyenne. Cela nous conduit à utiliser une autre version de la règle de 3-Sigma avec l'*Ecart Mobile* appelée *Individual-x Chart* [Nist 2004]. Ces adaptations nous apportent à remplacer le système d'équations IV.7 par le système d'équations IV.8 donné dans [Kim 2001] :

$$\begin{cases} UCL = \bar{x} + 3 \frac{\overline{MR}}{d_2} \\ LCL = \bar{x} - 3 \frac{\overline{MR}}{d_2} \end{cases} \quad (IV.8)$$

Où  $\bar{x}$ : remplace la moyenne de la population  $\mu$ .  $\overline{MR}$  est l'*écart mobile* qui représente la moyenne des écarts entre deux points adjacents  $|x_i - x_{i-1}|$ .  $d_2$  : est une constante utilisée pour estimer l'écart type d'un échantillon d'observation de taille donnée. Comme c'est indiqué dans [Nist 2004, Kim 2001] pour l'exemple de  $\overline{MR}$  de taille deux,  $d_2$  est approximativement égale à 1,128.  $\frac{\overline{MR}}{d_2}$  est utilisé pour remplacer l'écart type  $\sigma$ .

### c) Algorithme de Flip-Flop

Le principe du filtre Flip-Flop est comme suit : Si une valeur d'estimation de la BPD est entre les limites de contrôle UCL/LCL, le filtre Flip-Flop considère que cette valeur contient peu de bruit. Par conséquent elle nécessite un filtrage avec *une petite valeur du gain*. En revanche si une valeur est hors UCL/LCL elle sera considérée comme trop bruitée, alors elle doit être amortie avec *une grande valeur du gain*.

Ainsi, le filtre Flip-Flop [Kim 2001] est composé de deux filtres EWMA (équations IV.9). Le premier est un filtre *agile*  $F_a$  avec un gain  $\lambda_1 = 0,1$  et le deuxième est un filtre *stable*  $F_s$  avec un gain  $\lambda_1 = 0,9$ . Pour chaque valeur filtrée, Flip-Flop applique un seul filtre à la fois en utilisant la règle 3-sigma afin de choisir entre  $F_a$  et  $F_s$  durant le processus de filtrage.

$$\begin{cases} (F_a): EF_t = 0,1 EF_{t-1} + 0,9 E_t \\ (F_s): EF_t = 0,9 EF_{t-1} + 0,1 E_t \\ t = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (IV.9)$$

Tant que les valeurs d'estimations se situent dans les limites UCL et LCL le filtre  $F_a$  est utilisé. Si la valeur d'estimation est en dehors des limites UCL et LCL le filtre  $F_s$  est utilisé. En d'autres termes, le filtre Flip-Flop est agile en appliquant  $F_a$  lorsqu'il y a des petits changements, pour les grands changements le Flip-Flop applique le filtre stable  $F_s$  pour amortir ces changements. La Figure IV.5 illustre comment le filtre Flip-Flop choisit entre ses deux filtres EWMA et la Figure IV.6 montre un exemple de l'application du filtre Flip-Flop sur un ensemble de valeurs d'estimation de la BPD.

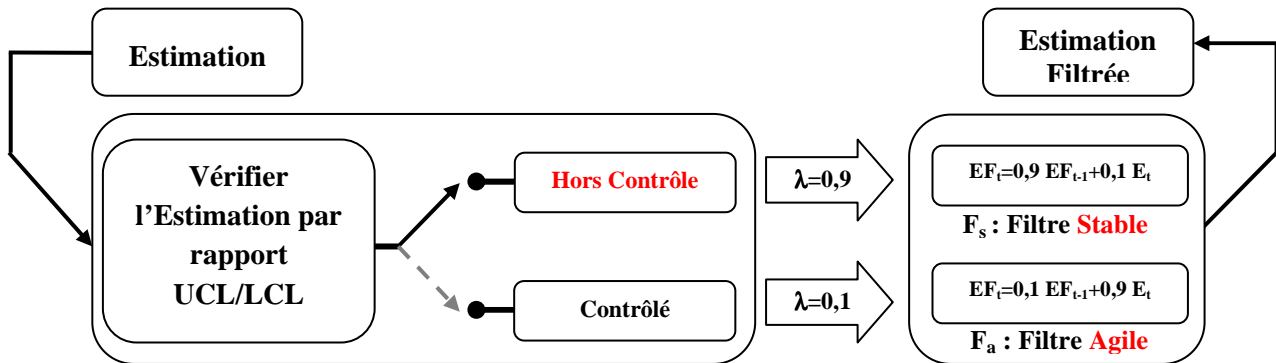


Figure IV.5 : La sélection entre les filtres agile et stable dans le filtre Flip-Flop

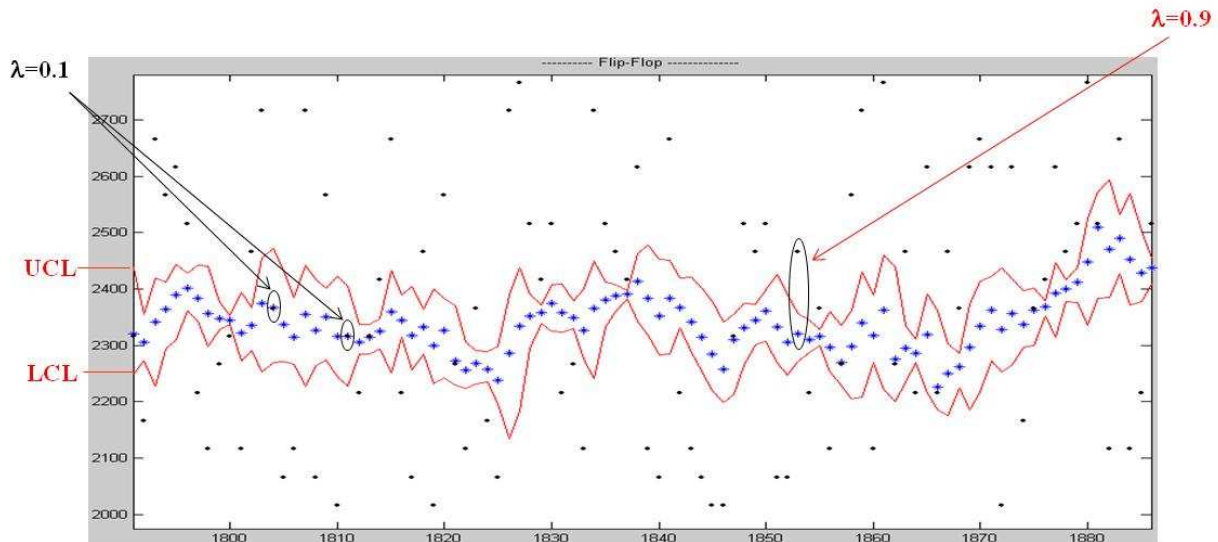


Figure IV.6 : L'application du filtre Flip-Flop sur un processus d'estimation de la BPD

## IV.1.2 Contribution : Filtrage par Zone

Nous partons du principe que les estimations qui sont à l'intérieur des limites de contrôles contiennent aussi du bruit. Ce bruit devient de plus en plus important en se rapprochant des deux limites UCL/LCL. Ainsi, les estimations deviennent de plus en plus instables. Par conséquent, nous devons augmenter le degré de filtrage en augmentant la valeur du gain  $\lambda$  graduellement à chaque fois que la valeur estimée de la BPD se rapproche de l'UCL

ou de LCL. Contrairement au filtre Flip-Flop qui donne une seule valeur à  $\lambda$  ( $\lambda = 0.1$ ) pour toutes les valeurs d'estimations qui sont à l'intérieur des limites de contrôle UCL/LCL.

Ainsi, nous avons opté pour un filtrage plus raffiné à plusieurs niveaux en utilisant des règles statistiques appelées WECO (Western Electric Company rules) [Nist 2004]. Ces règles ont été développées pour améliorer la sensibilité des cartes de contrôle des CSP. Nous avons fait un découpage de la zone principale entre UCL/LCL en plusieurs zones de tailles égales. Ce découpage est symétrique par rapport au centre (la moyenne). A chaque zone un gain est affecté, ces gains sont calculés à partir des lois de probabilités liées au WECO. Ainsi, Le résultat de ce travail est la proposition d'un nouveau filtre adaptatif appelé Zone-Filter [Amamra 2004]. Ce filtre se compose de quatre filtres EWMA indépendants chaque filtre correspond à une zone dans le graphique de contrôle. Avant de présenter Zone-Filter, nous allons présenter les règles WECO ainsi le découpage en zones et les lois de probabilités appliquées à ces zones.

#### IV.1.2.1 Les règles de WECO

Ce sont des règles basées sur les lois de probabilité. Nous savons que pour une distribution normale, la probabilité de rencontrer un point en dehors du  $\pm 3\sigma$  est 0.3%, c'est un événement rare. Par conséquent, si nous observons un point en dehors des limites de contrôle, nous pouvons conclure que le processus est instable.

De même, nous pouvons identifier d'autres événements qui sont également rares et les employer comme des signes d'instabilité du processus. Ces événements sont décrits comme suit :

- 1- Une cause spéciale existe si **Huit** sur **Neuf** points consécutifs se trouvent entre la moyenne  $\mu$  et  $+\sigma$  (respectivement entre  $\mu$  et  $-\sigma$ ).
- 2- Une cause spéciale existe si **Quatre** sur **Cinq** points consécutifs se trouvent entre  $+\sigma$  et  $+2\sigma$  (respectivement entre  $-\sigma$  et  $-2\sigma$ ).
- 3- Une cause spéciale existe si **Deux** sur **Trois** points se trouvent entre  $+2\sigma$  et  $+3\sigma$  (respectivement entre  $-2\sigma$  et  $-3\sigma$ ).
- 4- Une cause spéciale existe si **Un Seul** point se trouve hors  $+3\sigma$  (respectivement hors  $-3\sigma$ ).

L'objectif des règles de WECO est d'augmenter la sensibilité du processus aux perturbations externes [Nist 2004]. Un résumé de ces règles sont illustrés par la Figure IV.7 Dans la section suivante nous détaillons la démarche d'extraction des valeurs des gains des filtres EWMA à partir des règles WECO. Les filtres EWMA constitueront notre filtre Zone-Filter.

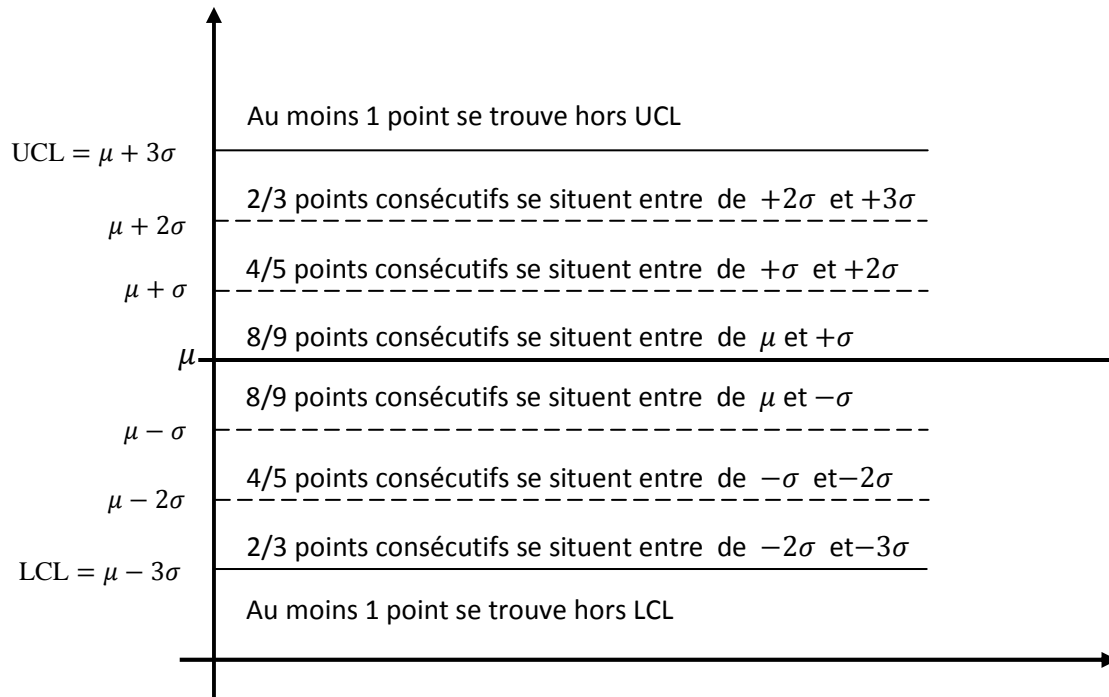


Figure IV.7 : Les règles de WECO et les probabilités correspondantes

#### IV.1.2.2 Le filtre adaptatif Zone-Filter

La première étape dans la construction du Zone-Filter est de diviser l'espace entre la limite supérieure UCL et la moyenne  $\mu$  en trois secteurs équidistants. Ceci est alors répété pour l'espace symétrique entre la moyenne  $\mu$  et la limite inférieure LCL. Les zones sont nommées zone A, B et C. Ainsi, chaque zone est de taille égale à  $\sigma$ . La zone D est l'espace hors des deux limites de contrôles (Figure IV.8).

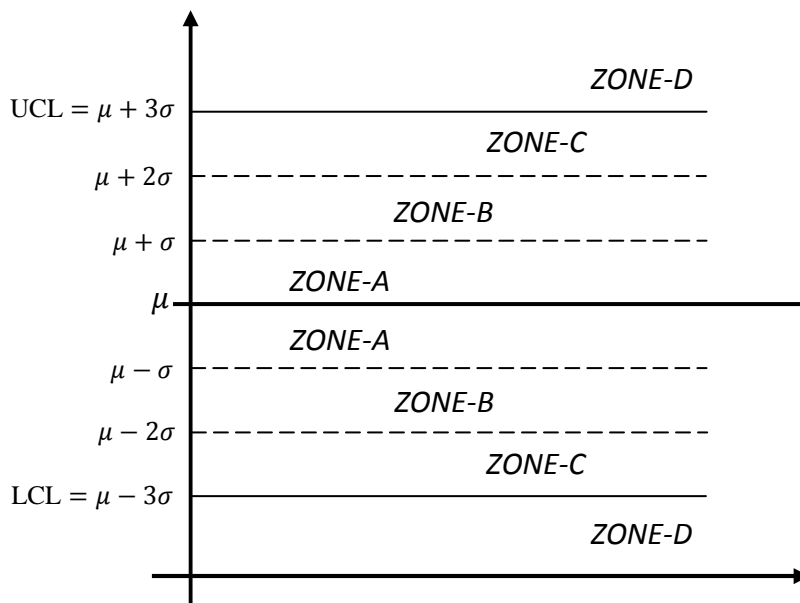


Figure IV.8 : La division du graphe de contrôle en Zones

La deuxième étape est de combiner ces zones avec les règles de WECO pour générer quatre gains de valeurs différentes. Ces gains sont utilisés pour mettre en place quatre filtres EWMA indépendants, chaque filtre correspond à une zone dans le graphe de contrôle. Ainsi, nous appliquons le filtrage d'une manière plus fine et progressive. Ce filtrage est proportionnel aux bruits associés aux valeurs estimées de la BPD.

Pour modéliser les règles WECO, nous appelons  $\varphi$  le degré de stabilité d'une zone, tel que  $0 < \varphi < 1$  et sur le quel nous pouvons juger la stabilité des estimations appartenant à cette zone. Par exemple : une zone avec un degré de stabilité  $\varphi = 0,7$  signifie que toutes les estimations appartenant à cette zone sont stables à 0,7 ( $\varphi$ ) et instable à 0,3 ( $1 - \varphi$ ). Une estimation est complètement stable si elle appartient à une zone avec un degré de stabilité  $\varphi = 1$  et vice-versa.

$$\varphi : \forall E_i \in Z_j, E_i \text{ est stable à } \varphi \text{ et instable à } (1 - \varphi)$$

Tel que  $0 \leq \varphi \leq 1$  et  $Z_j$  l'ensemble des estimations.

Prenant la **Zone-A**, les estimations sont stables jusqu'à que nous avons 8/9 successives des estimations dans cette zone pour juger qu'elles sont instables. Alors nous pouvons dire que la **Zone-A** a un degré de stabilité  $\varphi = 8/9$ . Par conséquent les estimations appartenant à cette zone sont 8/9 stables et 1/9 instables. Ainsi, nous utilisons ce degré de stabilité pour déterminer la valeur du gain  $\lambda$  du filtre EWMA. Par exemple, nous considérons  $F_A$  le filtre EWMA correspond la **Zone-A** (équation IV.10), pour obtenir une estimation filtrée  $EF_t$  plus stable, le poids de l'estimation actuelle  $E_t$  doit être égal au degré de stabilité  $\varphi$  de cette zone, ainsi :

$$(F_A) : EF_t = \lambda_A EF_{t-1} + (1 - \lambda_A) E_t \quad (IV.10)$$

$$(1 - \lambda_A) = \varphi = 8/9 \Rightarrow \lambda_A = 1/9$$

$$\text{Alors } (F_A) : EF_t = 1/9 EF_{t-1} + 8/9 E_t \quad (IV.11)$$

De cette manière, nous compensons le manque de stabilité de l'estimation actuelle  $E_t$  en pondérant l'estimation filtrée précédente  $EF_{t-1}$  supposée stable, par le degré de stabilité qui manque ( $1 - \varphi$ ). L'équation IV.11 représente la forme finale du filtre  $F_A$  utilisé pour filtrer les estimations appartenant à la **Zone-A**. Nous procédons de la même manière pour la **Zone-B** et la **Zone-C**. Pour la **Zone-D**, selon les règles de WECO les estimations ne doivent pas exister dans cette zone. S'il y a au moins une estimation dans la **Zone-D**, cela signifie que la stabilité de cette estimation tend vers zéro. Ainsi, le degré de stabilité  $\varphi$  de cette zone prend une valeur très petite égale à 0,1. Par conséquence, le gain  $\lambda_D = 0,9$  peut stabiliser cette estimation. Le Tableau IV.1 ci-dessous récapitule les principales caractéristiques des quatre filtres EWMA.



	ZONES	Filtre EWMA	degré de Stabilité $\phi$	Gain $\lambda$
<b>F<sub>A</sub></b>	<b>Zone-A</b>	$EF_t = 1/9 EF_{t-1} + 8/9 E_t$	8/9	1/9
<b>F<sub>B</sub></b>	<b>Zone-B</b>	$EF_t = 4/5 EF_{t-1} + 1/5 E_t$	4/5	1/5
<b>F<sub>C</sub></b>	<b>Zone-C</b>	$EF_t = 2/3 EF_{t-1} + 1/3 E_t$	2/3	1/3
<b>F<sub>D</sub></b>	<b>Zone-D</b>	$EF_t = 0,9 EF_{t-1} + 0,1 E_t$	0.1	0.9

Tableau IV.1 : Quatre filtres EWMA qui composent le Zone-Filter

Le Tableau IV.1 montre les quatre filtres EWMA qui composent notre filtre adaptatif Zone-Filter. Au cours de processus de filtrage chaque filtre est exécuté indépendamment des autres filtres selon la zone où se trouve estimation. la Figure IV.9 illustre le fonctionnement du filtre Zone-Filter.

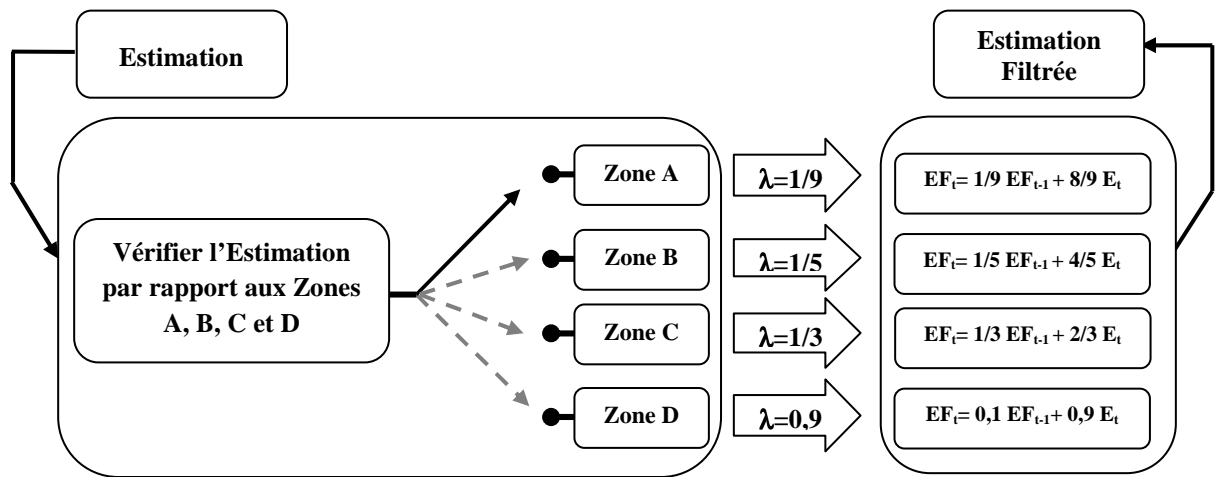


Figure IV.9 : Le fonctionnement du Zone-Filter en sélectionnant le filtre selon la Zone

Ainsi, le même processus d'estimation de la BPD filtrées par Flip-Flop dans la Figure IV.6 sont filtrées avec Zone-Filter et la Figure IV.10 montre les résultats de ce filtrage avec les quatre zones qui correspond aux quatre filtres EWMA.

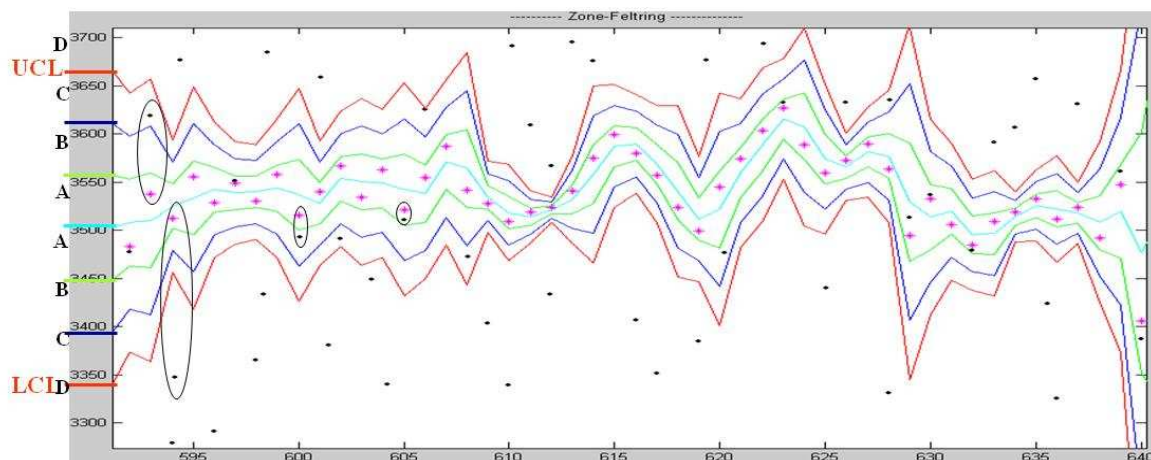


Figure IV.10 : L'application du filtre Zone-Filter sur un processus d'estimation de la BPD

### IV.1.3 Evaluation des filtres Flip-Flop et Zone-Filter

Dans les travaux de Kim [Kim 2001], le filtre Flip-Flop fournit des performances supérieures aux autres filtres (Filtre de Stabilité, filtre d'Erreur). Ainsi, nous avons décidé de comparer seulement les performances du filtre Flip-Flop avec le filtre Zone-Filter. Une simulation des réseaux Ad Hoc sans fil avec le logiciel OPNET nous a permis de faire cette comparaison. Les résultats de cette simulation sont analysés en utilisant MATLAB.

#### IV.1.3.1 Scenarios et expérimentations

Nous avons appliqué les filtres sur les mêmes scénarios de simulation en employant le logiciel OPNET. Le nombre total des nœuds est 6 (5 clients et un serveur) qui constituent un réseau sans fil Ad-Hoc (Figure IV.11). Les nœuds sont fixes. Chaque nœud est équipé d'une carte sans fil de Wi-Fi IEEE 802.11b avec 11 Mb/s. Tous les nœuds communiquent avec un serveur. Le calcul des RTT est effectué par un seul nœud (nœud N°1), pour ce nœud le serveur joue le rôle d'un écho. Le rôle des quatre nœuds qui reste est d'injecter un trafic concurrent (avec un débit constant de 1 Mb/s) dans le réseau pour consommer de la bande passante, le serveur détruit les paquets qu'il reçoit de ces nœuds. Nous avons établi dix scénarios. Nous avons choisi un seul scénario représentatif dont les résultats obtenus seront présentés et discutés.

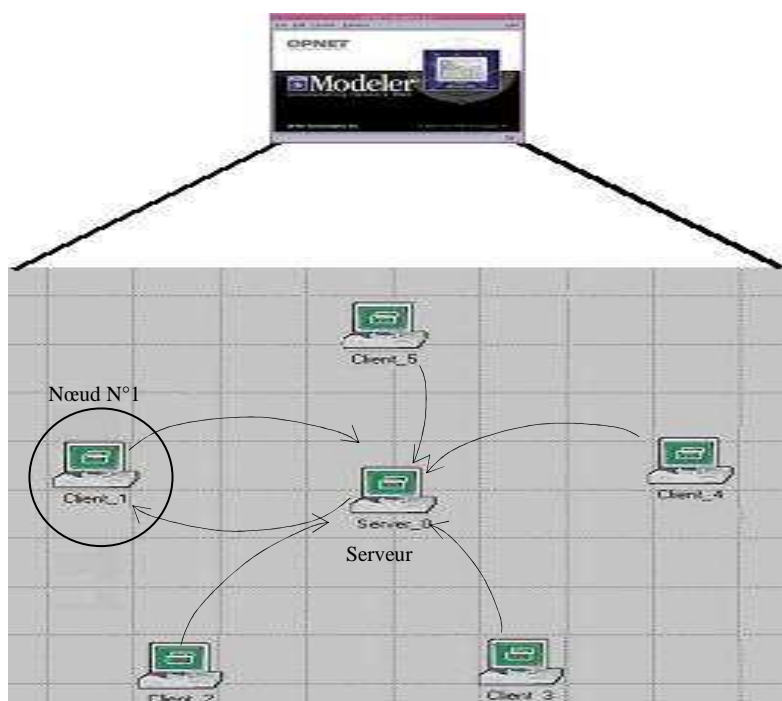


Figure IV.11 : Topologie Ad-Hoc pour tester les filtres Flip-Flop et Zone-Filter

Le scénario commence avec seulement la mesure du RTT par le nœud N°1 sans Trafic Concurrent. Après 5 minutes, le nœud N°2 commence à injecter le premier Trafic Concurrent vers le serveur avec un débit constant de 1Mb/s. Puis, chaque 5 minute un nouveau nœud commence l'envoi du Trafic Concurrent avec le même débit (1 Mb/s) et cela pour les 4 nœuds.

Le temps total de la durée de simulation est de 25 minutes. Les résultats sont enregistrés dans des fichiers .txt puis analysés en employant le logiciel de MATLAB.

#### IV.1.3.2 Résultats et discussions

La Figure IV.12 et la Figure IV.13 montre respectivement les résultats de notre simulation obtenus par les filtres Flip-Flop et Zone-Filter. Les points montrent les estimations non filtrées obtenues par le nœud N°1, la ligne continue trace les estimations après filtrage.

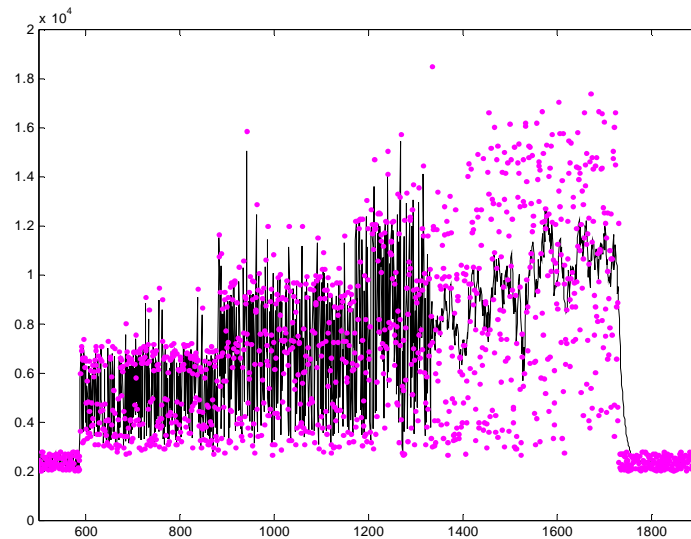


Figure IV.12 : Filtrage des estimations en utilisant le filtre Flip-Flop

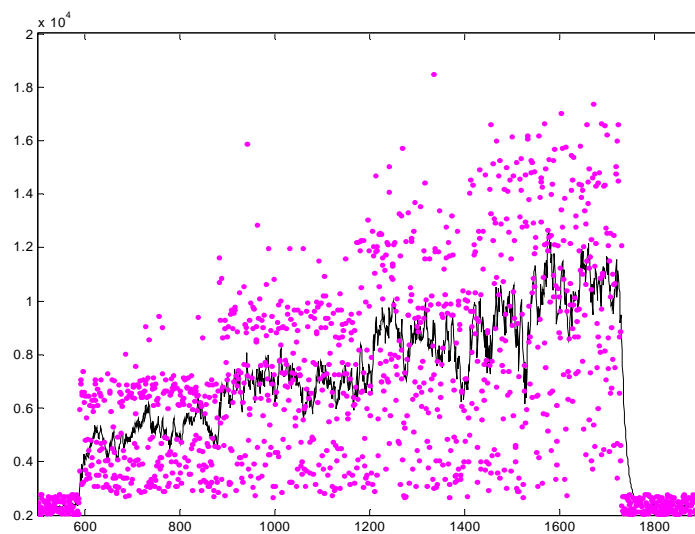


Figure IV.13 : Filtrage des estimations en utilisant le Filtre Zone-Filter

La première chose visible que nous pouvons remarquer est que le Zone-Filter est plus stable est plus résistant au bruit que le filtre Flip-Flop. Ce dernier récupère sa stabilité autour de 1400 secondes après une longue période d'instabilité. Ce comportement est la conséquence du calcul de ses limites de contrôle UCL/LCL et de la fréquence de leur mise à jour. En effet, le filtre Flip-Flop considère que toutes les estimations jusqu'au 1350<sup>ième</sup> secondes sont à l'intérieur des deux limites de contrôles, ainsi elles sont filtrées à  $\lambda$  égale à 0,1. Par conséquent la plupart des estimations filtrées sont proches des données brutes. Cela est illustré dans la première partie de la courbe de la Figure IV.12, où les estimations filtrées montrent une très grande variabilité. Après la 1350<sup>ième</sup> seconde, le filtre Flip-Flop met à jour ses limites de contrôle en détectant une estimation en dehors de UCL/LCL. Cependant, le filtre Zone-Filter procède au filtrage même à l'intérieur des deux limites de contrôle selon la zone où l'estimation appartienne. En outre, Zone-Filter met à jour et mis à jour ses limites de contrôle à chaque estimation. Ce filtrage est plus adaptatif et adéquat pour chaque valeur d'estimation. Ce type de filtrage fournit des estimations filtrées plus stables, cela est montré par la Figure IV.13. Par conséquent, les estimations filtrées par Zone-Filter montrent meilleur stabilité que celles filtrées par Flip-Flop.

Nous pouvons évaluer la performance de chaque filtre en calculant un paramètre nommé le Coefficient de Variation (CV) utilisé par [Kim 2001]. Le CV est le rapport entre l'écart-type et la moyenne. Il décrit la stabilité du filtre et mesure le degré auquel le bruit affecte une estimation filtrée. En conséquence, des petites valeurs de CV sont les meilleures.

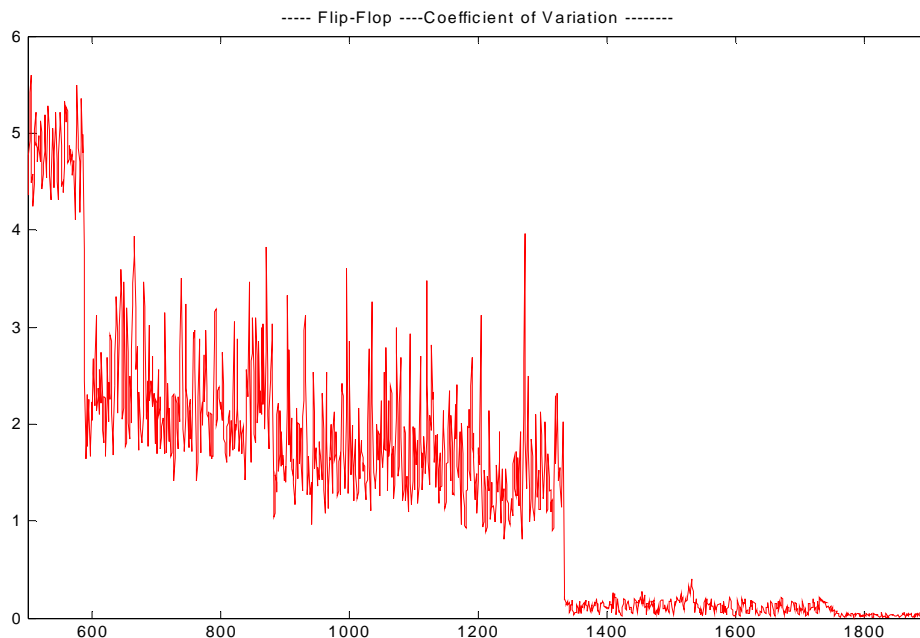


Figure IV.14 : Le CV pour le filtre Flip-Flop

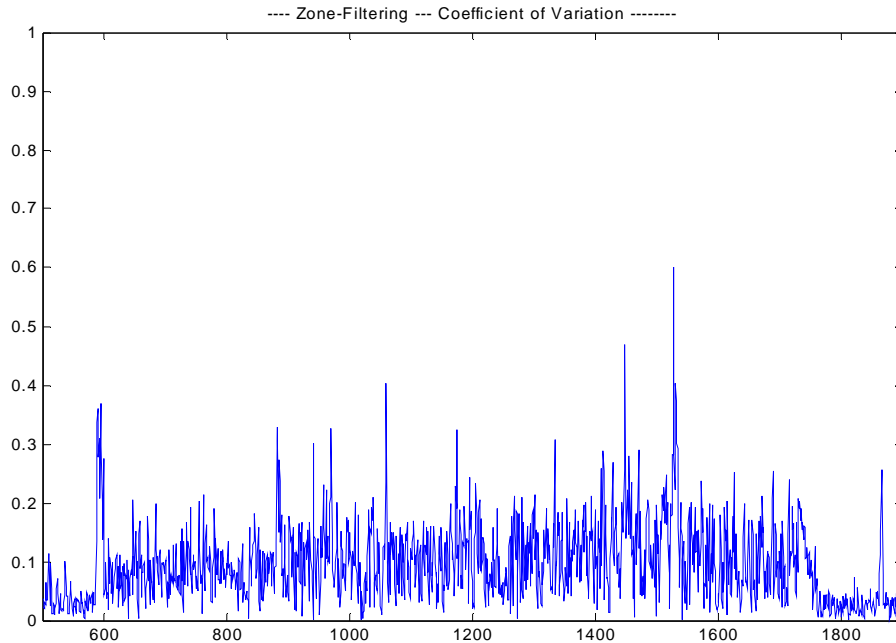


Figure IV.15 : Le CV pour le filtre Zone-Filter

La figure IV.14 et la Figure IV.15 illustrent respectivement le CV des filtres Flip-Flop et Zone-Filter. Il est évident que le filtre Zone-Filter possède des CV très inférieures à ceux du filtre Flip-Flop. Par conséquent, les estimations filtrées avec le filtre Zone-Filter sont moins affectées par le bruit que les estimations filtrées par le filtre Flip-Flop.

## IV.2 Mise en œuvre de l'estimateur de la BPD TOPP-NET

Plusieurs mises en œuvre de l'estimateur de la BPD TOPP-NET peuvent être envisagées, selon les besoins des applications en termes de BPD et selon l'objectif à atteindre en utilisant le service de l'estimation de la BPD.

L'estimateur TOPP-NET peut être utilisé par un internaute simple pour estimer la BPD entre sa machine et une autre machine distante. Il peut être utilisé dans un protocole de routage pour mettre en place une table routage avec la valeur de la BPD pour chaque route trouvée. Aussi, l'utilisation de l'estimateur de la BPD pendant la recherche de la route nous permet de choisir parmi les chemins trouvés, celui avec la valeur de la BPD la plus élevée. Il peut être combiné avec un protocole adaptatif pour être utilisé dans la mise en place d'une différenciation de service, avec l'utilisation de plusieurs files d'attente où chaque file est affectée à un service et par conséquent à un type de flux de données. Dans les paragraphes suivants nous détaillerons ces différentes mises en œuvre de TOPP-NET.

### IV.2.1 Processus indépendant

Une mise en œuvre intuitive de l'estimateur TOPP-NET est celle d'un processus indépendant dans un système d'un nœud sans fil. Cela peut être réalisé en exécutant TOPP-

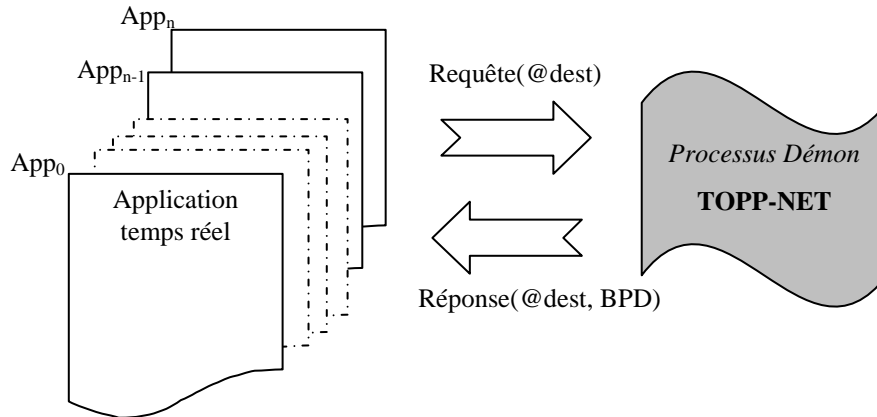


Figure IV.16 : TOPP-NET en tant que processus Daemon

NET en tant que processus démon indépendant des autres processus du système. Dans ce cas TOPP-NET peut recevoir des requêtes de la part d'une ou plusieurs applications désirant estimer la BPD d'un chemin avec un nœud destination donnée. L'intérêt de cette mise en œuvre est que TOPP-NET ne dépend d'aucune application particulière et rend le service d'estimation de la BPD à plusieurs applications de natures différentes (télémédecine, capteur hydrique,...).

Une illustration de cette mise en œuvre est donnée par la Figure IV.16 qui montre l'interaction entre l'estimateur et les applications. Ces dernières envoient des requêtes avec l'adresse de destination, et TOPP-NET rend une réponse avec l'adresse de destination et la valeur de la BPD.

### IV.2.2 Protocole d'émission adaptatif

Grâce à l'estimateur TOPP-NET, la BPD est connue par chaque nœud. Ce la simplifie la mise en place d'un protocole d'émission adaptatif (Figure IV.17). Ce protocole a pour objectif d'adapter le mode de transmission d'un nœud en fonction de la valeur de la BPD estimée par TOPP-NET. Cette adaptation permet de prévenir et éviter une surcharge du réseau.

Le protocole d'émission adaptatif est composé d'un automate adaptatif et de plusieurs files d'attente. Le trafic est classé en plusieurs types selon un critère bien défini (taille de paquet, l'importance du message, priorité de message,...). Chaque file d'attente est associée à un type de trafic. Par conséquent, le nombre de ces derniers détermine le nombre des files d'attentes dans le protocole, (Figure IV.17).

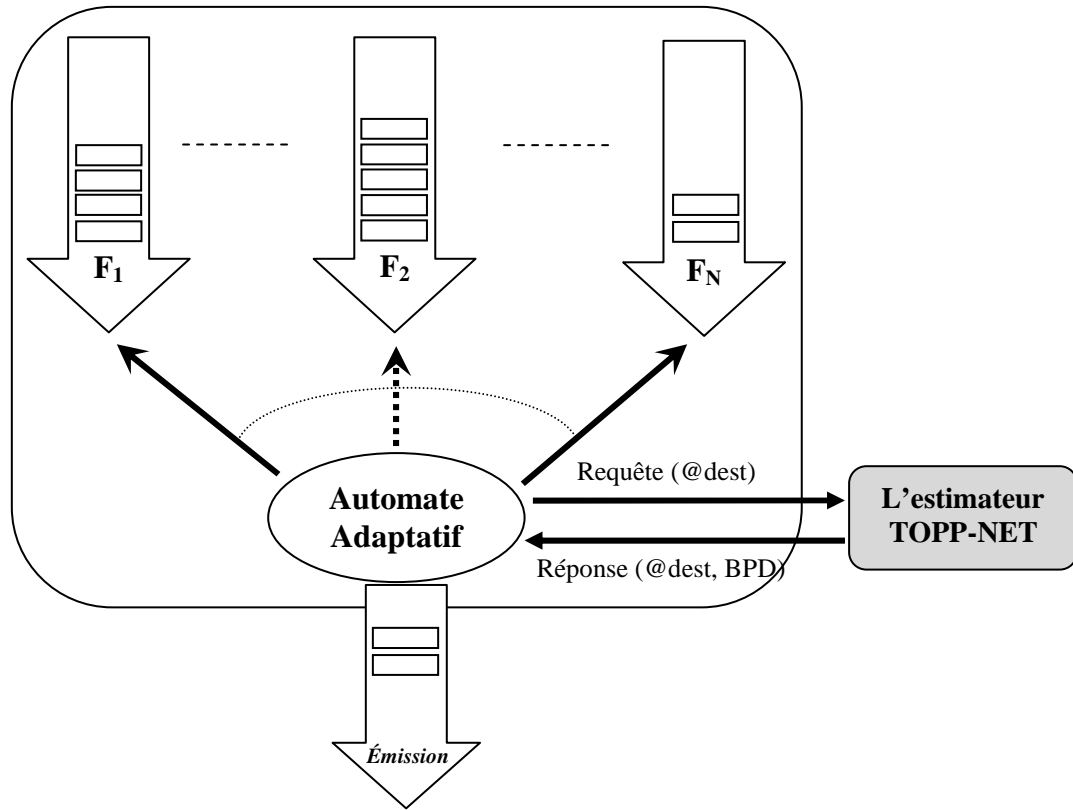


Figure IV.17 : Protocole d'émission adaptatif utilisant l'estimateur TOPP-NET

L'automate est composé d'ensemble d'états, où chaque état correspond à un seuil de la BPD. Le protocole transite d'un état à un autre selon la disponibilité de la bande passante. Cette dernière est mesurée périodiquement par l'estimateur TOPP-NET. La période d'estimation dépend du type d'application qui l'utilise et de la stabilité de la charge du réseau.

Un exemple d'automate adaptatif est proposé dans la Figure IV.18. Cet automate se compose de quatre états correspondant à quatre niveaux de la BPD :  $S_i$  avec  $i \in \{0, 1, 2 \text{ et } 3\}$ . Lorsque la BPD atteint un seuil  $S_i$ , les conditions d'émission changent et le processus d'émission de message change d'état en privilégiant une autre politique d'émission de message.

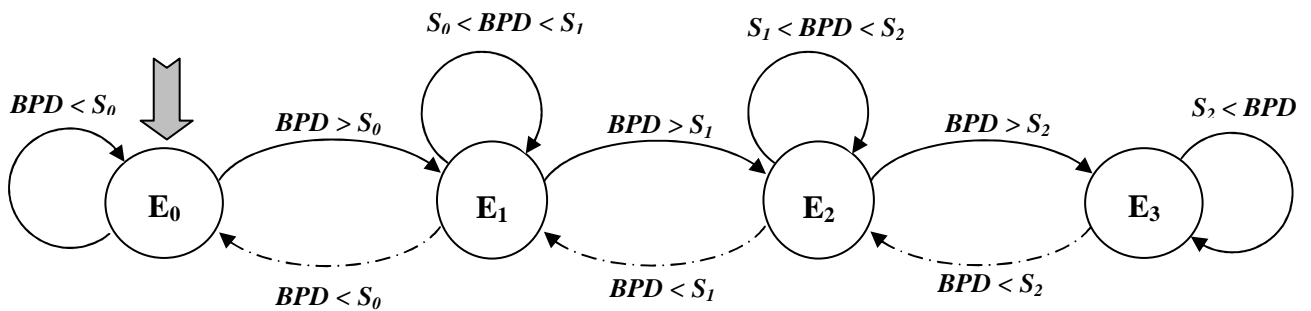


Figure IV.18 : L'automate de gestion d'émission Adaptatif

Le processus d'émission de message commence par le niveau le plus bas  $E_0$  afin de ne pas saturer le réseau sans avoir fait d'estimation de la BPD. Au fur et à mesure, l'automate atteint son niveau d'émission maximum  $E_3$ , si les conditions du trafic réseau le permettent. En revanche, quand un nouveau nœud rejoint le réseau, ou lorsque les conditions du médium sans fil se dégradent, l'automate régresse à l'état précédent. Périodiquement, en fonction de la BPD estimée, le processus d'émission met à jour l'état de l'automate. Ainsi, l'automate sélectionne la file d'attente selon l'état où il se trouve pour émettre les messages qu'elle contienne.

L'utilisation combinée de l'estimateur TOPP-NET et de l'automate d'émission adaptatif permet d'avoir un comportement "citoyen" de chaque nœud du réseau : en effet, dans le cas d'une saturation du réseau, il est inutile que le nœud émette un message qui serait perdu par manque de bande passante. Cela minimise la consommation d'énergie des nœuds et évite l'écroulement des performances du réseau : grâce à TOPP-NET, l'émission est conditionnée par la disponibilité de la bande passante. Ce comportement adaptatif permet d'assurer la QoS du réseau en favorisant notamment les messages prioritaires.

## **IV.2.3 Différentiation des Services**

### **IV.2.3.1 Modèles de QoS**

Les modèles de la QoS cités dans le premier chapitre comme IntServ, DiffServ, FQMM, SWAN, INSIGNIA..., intègrent plusieurs niveaux de services (Best-Effort, Guaranteed Service, Trafic temps réel...). Ces modèles trient leurs trafics en plusieurs classes de flux de données. Chaque service est associé à une ou plusieurs classes. L'estimateur de la BPD avec le protocole adaptatif peut être intégré dans ces modèles.

Ainsi, chaque file d'attente du protocole adaptatif est affectée à un service donné. La différenciation de services est offerte en utilisant l'automate adaptatif avec un nombre d'états varie selon le nombre de services proposés par ces modèles.



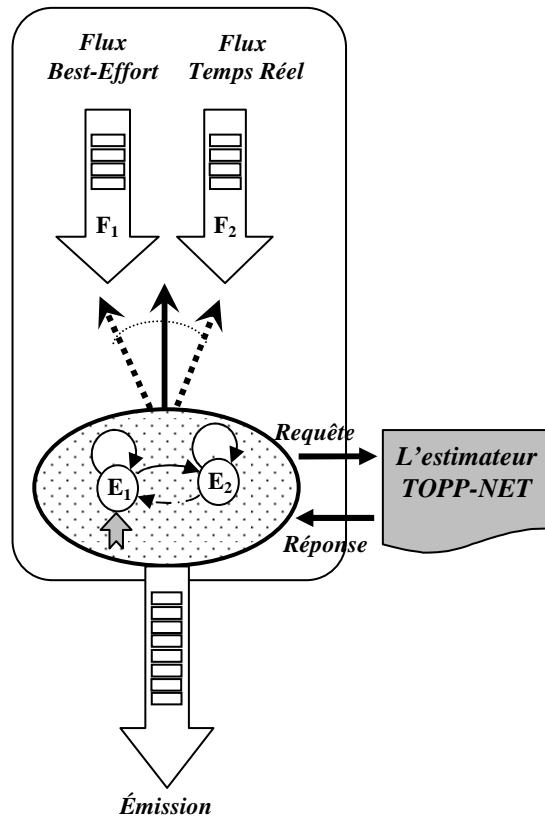


Figure IV.19 : Exemple de Différentiation de Services dans un modèle de la QoS avec TOPP-NET

#### IV.2.3.2 Applications Multimédia/Temps réel

L'estimateur TOPP-NET peut être utilisé comme un module indépendant dans une application donnée (multimédia ou temps réels). Ce module s'occupe de la relation de l'application avec le réseau, dont le rôle principale est de gérer la politique d'émission des messages. Les applications trient leur trafic en plusieurs classes (audio, vidéo, temps réels). Avant d'envoyer un message sur le réseau l'application peut consulter l'estimateur TOPP-NET pour avoir une image sur l'état de la connexion en mesurant la BPD et jugé quel type de message doit envoyer.

Cette utilisation permet à l'application d'avoir une gestion adaptative de sa communication avec l'extérieur en privilégiant les messages les plus importants. Ce qui permet d'avoir une BPD minimale garantie pour envoyer les messages les plus urgents (Alarme, données sécurisées et urgentes,...). Aussi, cette mise en œuvre évite le comportement aléatoire des applications vis-à-vis à l'émission et à la réception des données dans le réseau, ce qui peut conduire à une surcharge du réseau.

#### IV.2.3.3 Protocoles de routage avec QoS

Dans le premier chapitre (section I.5.4), nous avons parlé du routage avec QoS dont le but est de trouver des routes qui satisfaites certains critères de la QoS. Le seul critère que nous utilisons ici c'est la BPD, ainsi nous parlons du routage *mono critère*. Quand un protocole de

routage découvre plusieurs routes, c'est celle avec la plus grande valeur de la BPD qui sera sélectionnée. Parmi les protocoles qui peuvent être enrichi en QdS nous citons : OLSR [Badis 2004], AODV [Perkins 2003a] et CEDAR [Sivakumar 1999].

L'estimateur TOPP-NET peut être utilisé par ces protocoles comme un module d'estimation de la BPD. Cette utilisation permet de choisir une route avec la plus grande valeur de la BPD et/ou de mettre à jour une table de routage avec la valeur de la BPD correspondante pour chaque route.

Nous abordons dans la section suivante, la mise en œuvre de l'estimateur TOPP-NET dans un protocole de communication inter-véhicule appelé CIVIC (Communication Inter-Véhicules Intelligente et Coopérative). Nous présentons en bref les différents aspects de ce protocole.

#### **IV.2.4 Le protocole CIVIC (Communication Inter Véhicules Intelligente et Coopérative)**

CIVIC [Hou 2005, Chanet 2007] (protocole de Communication Inter Véhicules Intelligente et Coopérative) est un nouveau protocole en phase de développement par notre équipe SMIR (Système Multi-sensoriel Intelligent intégré Réparti) dans le laboratoire LIMOS (Laboratoire d'Informatique, de Modélisation et d'Optimisation des Systèmes). L'implémentation matérielle de CIVIC est appelée e-CIVIC (Embedded CIVIC). Comme son nom l'indique, est un protocole de routage dédié à l'échange d'informations entre véhicules. CIVIC est un protocole qui prend en compte le contexte du réseau. Il doit faire face aux limitations de coût et des performances des applications des réseaux de capteurs sans fil.

Le protocole CIVIC (Figure IV.20) est dans l'esprit proche du protocole ZRP [Haas 2002] : suivant la position relative des nœuds (en nombre de sauts), le protocole se comporte différemment.

Notre objectif est d'intégrer l'estimateur de la BPD TOPP-NET dans le protocole CIVIC, cette intégration passe à travers le protocole d'émission adaptatif pour gérer différents types de flux de données.

##### **IV.2.4.1 Objectifs du protocole CIVIC**

L'objectif du protocole CIVIC est de gérer les communications dans des réseaux dont certains paramètres du réseau sont connus a priori. Parmi ces paramètres, la distribution géographique des nœuds (sur des routes par exemple), la position géographique des infrastructures, ou peuvent être obtenus comme la vitesse des nœuds mobiles : c'est le cas des réseaux de communication inter véhicules. Les applications clés de ces réseaux sont la prévention et la sécurité routière. Alerter en cas d'accident, prévenir les véhicules qui se dirigent vers le lieu d'accident. Avertir en cas d'un ralentissement anormal (travaux, bouchon,...). Diffusion de l'information urbaine dans la ville (Festivals, shopping, Espaces

libres dans les parkings...). Enfin, offrir l'accès à internet à travers des Hot-Spot installés sur les autoroutes.

#### IV.2.4.2 Architecture du protocole CIVIC

La Figure IV.20 Illustre les couches du protocole CIVIC, à chaque couche une implémentation basic est dédiée. Plusieurs fonctionnalités sont offertes aux applications CIVIC, telle que les différents types de diffusion des messages (Géocast, Broadcast, Multicast, Unicast), le routage avec prise en compte du contexte (positions et vitesses) et l'utilisation du GPS avec les cartes routières.

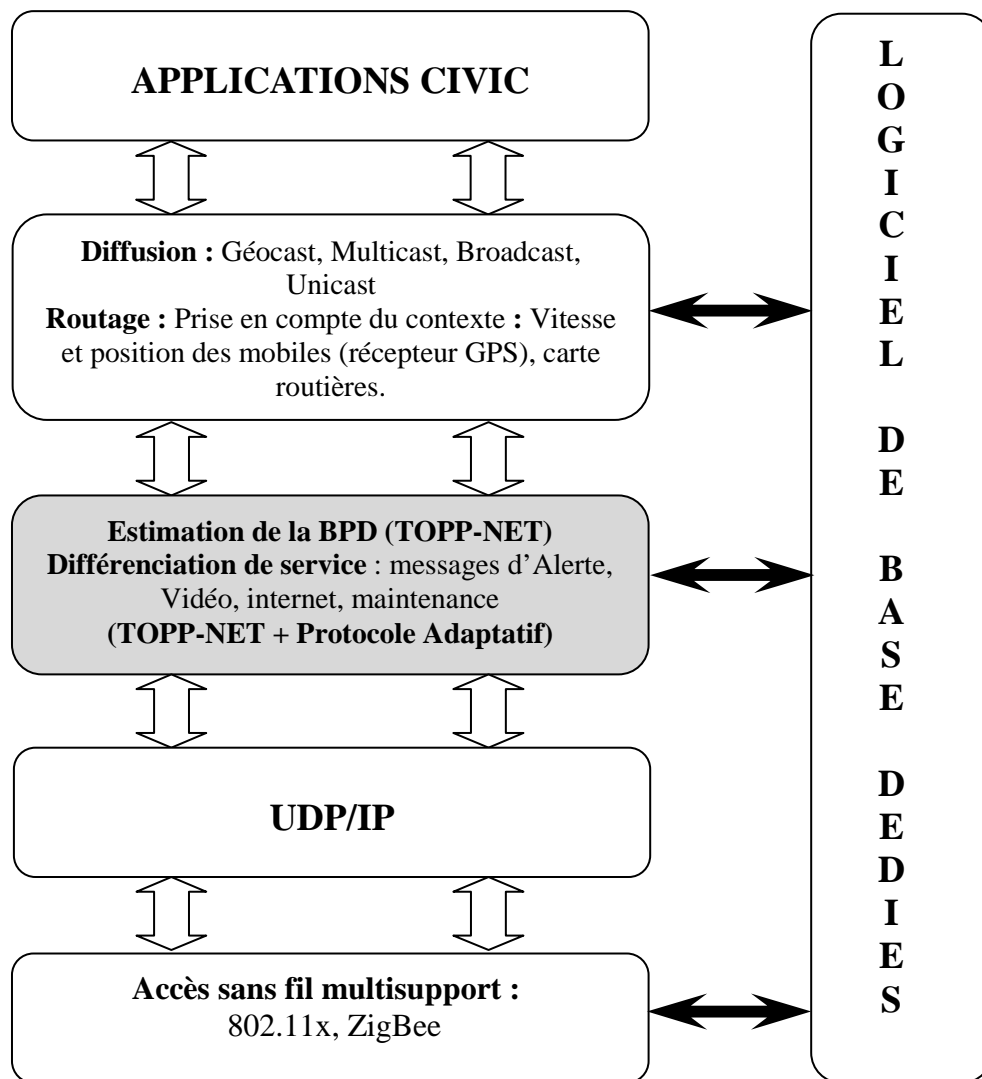


Figure IV.20 : Les couches du protocole CIVIC

La différenciation des services dans CIVIC est garantie en utilisant l'estimation de la BPD combinée avec le protocole d'émission adaptatif. Nous intervenons à ce niveau pour implémenter TOPP-NET et le protocole d'émission adaptatif. La différenciation de services est détaillée ci-dessous dans la section IV.2.4.4. Les messages utilisés dans CIVIC sont de type UDP/IP. Enfin, CIVIC opte pour une architecture multisupport en utilisant les

technologies Wi-Fi et ZigBee. Les principales caractéristiques de CIVIC sont listées ci-dessous [Chanet 2007].

#### **IV.2.4.3 Caractéristiques du protocole CIVIC**

Le protocole CIVIC est destiné à tout type de réseau de capteurs sans fil avec certains paramètres qui sont a priori connus (les positions des nœuds, la vitesse, le trajet ou l'espace d'évolution des nœuds...). Pour bien gérer ce type de réseau, CIVIC doit se disposer de certaines caractéristiques dont les principales sont :

- ***Architecture Hybride***

Les véhicules dans une autoroute ou dans un milieu urbain constituent des réseaux mixtes : Ad Hoc et Infrastructure. Le protocole CIVIC est également hybride. Le mode de fonctionnement ad hoc ne sert qu'à atteindre un point d'accès de l'infrastructure appelés MMRS (Multiservice Router and Server). Ces MMRS peuvent se situer le long d'une route avec des coordonnées géographiques connues. Chaque fois qu'un mobile passe à portée d'un MMRS, il lui signale sa destination. CIVIC utilise le paramètre de la destination pour le routage afin de savoir vers quel MMRS le nœud se rapproche. Par conséquent, chaque MMRS peut avoir une représentation dynamique de la distribution des nœuds. Les MMRS servent comme des passerelles vers d'autres réseaux et service (Internet, service de la ville, météo,...)

- ***Prise en compte le contexte géographique des nœuds***

La distribution et les mouvements des nœuds dans le réseau CIVIC ne sont pas aléatoires comme dans le cas d'un réseau Ad Hoc classique. Les nœuds sont fixes ou ils évoluent suivant des distributions connues (le long d'une route, au sein d'une parcelle). Le protocole CIVIC prend en compte le contexte géographique des nœuds en utilisant des cartes géographiques qui donnent la position des routes et des parcelles. Cette connaissance géographique permet au protocole CIVIC d'effectuer un "routage directionnel". Ce type de routage nous permet d'optimiser les transmissions (transmissions de bonne qualité avec des délais réduits) en privilégiant les directions où se trouvent potentiellement les nœuds.

- ***La prise en compte de la connectivité***

La densité des nœuds peut être très variable en fonction de leur position (centre ville ou périphéries) ou de l'heure (heures de pointes ou la nuit). La prise en compte de la vitesse et de la position des nœuds fait que la distance et le temps pour atteindre le MMRS le plus proche sont connus. L'émission d'un message n'est donc effectuée que si le destinataire est potentiellement joignable, sinon il est mis en file d'attente, tant que les conditions ne le permettent pas. Ce mode de fonctionnement permet de garder une connectivité entre les nœuds.

- **Le multisupport**

Dans le protocole CIVIC, au moins deux médiums de communication sont utilisés afin d'augmenter la robustesse, la tolérance aux pannes et la QoS. Les médiums notamment utilisés sont le ZigBee et le IEEE 802.11x. Pour réduire le coût et la consommation d'énergie des nœuds avec un seul support peuvent être également intégrés au réseau. D'autres caractéristiques du protocole CIVIC comme les différents types de diffusion des messages que nous pouvons trouver leurs détails dans [Hou 2005, Chanet 2007].

#### IV.2.4.4 Différenciation de service dans le protocole CIVIC

La différenciation de services est l'un des aspects de la QoS dans le protocole CIVIC (autres aspects comme : multisupport, prise en charge du contexte du réseau,...). Cette différenciation de services est assurée grâce à l'utilisation de l'estimateur TOPP-NET et le protocole d'émission adaptatif (Figure IV.21). CIVIC gère plusieurs niveaux de priorités de message et l'automate adaptatif est utilisé pour l'émission de ces messages selon la disponibilité de la BPD.

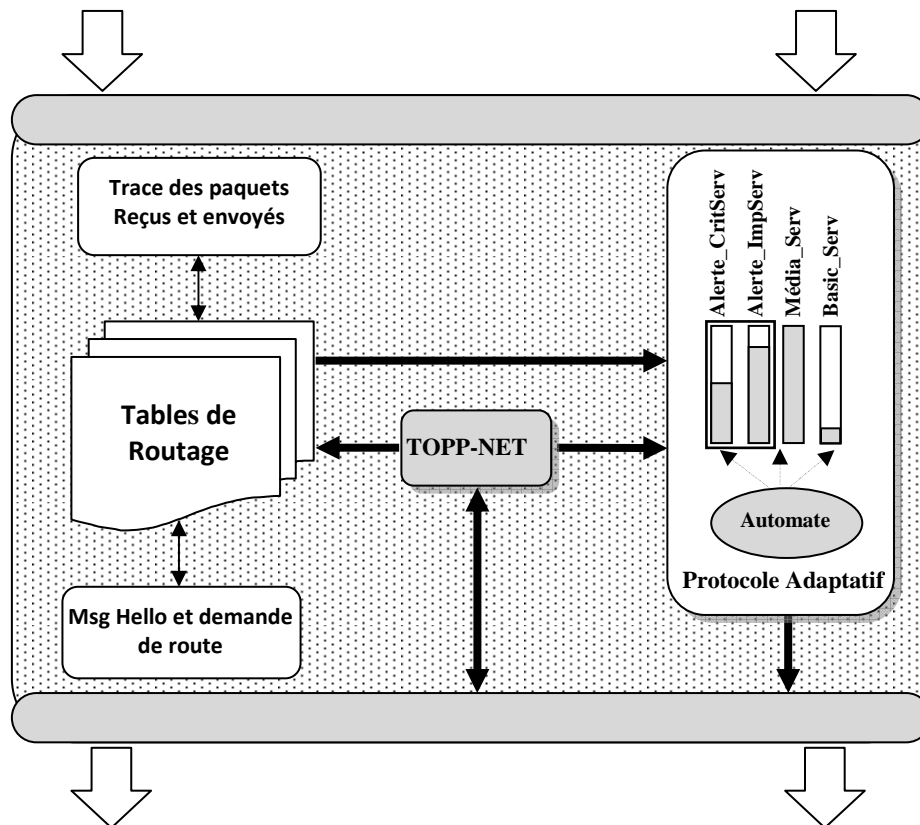


Figure IV.21 : L'estimateur TOPP-NET et la différenciation de services dans CIVIC

La figure IV.21 détaille la troisième couche de la pile du protocole CIVIC (Figure IV.20). La différenciation de services dans CIVIC est basée sur trois niveaux de services : le Basic\_Serv, Média\_Serv et Alerte\_Serv. Tel que, Basic\_Serv concerne les messages Internet. Média\_Serv, concerne les messages de type multimédia qui nécessitent BPD considérable

(audio, vidéo,...). Tandis que le niveau Alerte\_Serv est divisé en deux sous services : le service Alerte\_ImpServ, qui concerne les messages d'alerte importants (météo, embouteillage, ...) et le service Alerte\_CritServ, qui concerne les messages d'alerte critiques (accident, ...).

Grâce à l'utilisation du protocole d'émission adaptatif CIVIC peut garantir au minimum l'envoi des messages de type Alerte\_Serv. Par conséquent, une valeur minimale de la BPD est toujours disponible pour envoyer ce type de messages. TOPP-NET est utilisé aussi pour mettre à jour les tables de routage de CIVIC. L'utilisation du protocole d'émission adaptatif avec TOPP-NET permet de réduire les surcharges du réseau et d'augmenter ainsi la QdS.

### IV.3 Synthèse

Quelque soit le type de la technique d'estimation de la BPD, les estimations obtenues contiennent toujours du bruit. Le rapport estimation/bruit dépend de plusieurs facteurs dynamiques du réseau Ad-Hoc. Ainsi, un filtrage adaptatif des estimations est nécessaire.

Dans la première partie de ce chapitre nous avons présenté, notre nouveau filtre adaptatif Zone-Filter. Ce filtre est composé de quatre filtres EWMA avec des gains différents. L'innovation de notre travail est le choix de ces valeurs en utilisant les règles de (WECO) [Nist 2004]. Les valeurs de gain sont en fonction des zones où elle appartienne l'estimation. Ces zones sont établies en utilisant le graphe de contrôle de type *individual-x-chart* [Nist 2004] avec la règle 3-Sigma [Montgomery 2005]. Ces outils statistiques font partie des méthodes CSP, [Montgomery 2005]. Dans les travaux de [Kim 2001] le filtre Flip-Flop fournit des performances supérieures par rapport aux autres filtres tels que le Filtre d'Erreur et le Filtre de stabilité.

Les résultats obtenus par le filtre Zone-Filter sont moins bruités et nettement meilleurs que ceux obtenus avec le filtre Flip-Flop. Par conséquent, les estimations sont plus précises. Cette précision est atteinte grâce au filtrage fin et adaptatif selon la zone où se trouvée l'estimation, ce qui représente l'originalité de Zone-Filter.

Dans la deuxième partie, les différentes mises en œuvre de l'estimateur TOPP-NET sont présentées : en tant que processus indépendant où en le combinant avec un protocole d'émission adaptatif. Cette dernière peut être utilisée dans un modèle de QdS, avec une application multimédia et enfin avec un protocole de routage. Nous avons pris l'exemple de CIVIC [Hou 2005], qui est un protocole de routage en phase de développement dans notre laboratoire. Dans CIVIC nous utilisant les services : Basic\_Serv et Média\_Serv. Chaque service est associé à une file d'attente. Le service Alerte\_Serv est composé de deux sous services Alerte\_CritServ et Alerte\_ImpServ. Comme précédemment chaque service est affecté à une file d'attente du protocole adaptatif.

\*\*\*\*\*

## Conclusion et Perspectives

Les caractéristiques d'un médium radio sont fondamentalement différentes de celles d'un médium filaire usuel. Nombreuses sont les contraintes, liées aux réseaux Ad Hoc (topologie dynamique, l'absence d'une infrastructure...), dont il faut tenir compte lors de la conception de protocoles. La QdS dans ces réseaux est actuellement un sujet de recherche très actif. Cependant, il est très difficile de concevoir une solution commune répondant aux exigences de tous les types d'applications des réseaux Ad Hoc.

Dans notre travail de thèse, nous avons choisi d'étudier un aspect de la QdS qui est liée à bande passante disponible (BPD) dans les réseaux Ad Hoc basés sur la norme IEEE 802.11. Particulièrement, nous avons axé nos études sur les différentes techniques d'estimation de la BPD et avons évalué les performances de ces techniques du point de vue temps de réponse et précision des estimations. Ces techniques peuvent être utilisées dans d'autres types de réseaux sans fil ou filaire.

Le premier chapitre de cette thèse présente une introduction à la problématique de la QdS dans les réseaux Ad Hoc sans fil, ainsi que les différentes techniques d'estimation de la BPD. Premièrement, une présentation générale des caractéristiques de la technologie des réseaux sans fil est exposée. Aussi, le processus d'intégration de la QdS est présenté avec les contraintes liées aux particularités des réseaux Ad Hoc. En suite, les différents paramètres de la QdS (bande passante, RTT, OWD,...) sont définis. En considérant la bande passante comme un paramètre importante de la QdS, un état de l'art sur des différentes techniques d'estimation de la BPD est présenté. Ces techniques sont classées en deux groupes distincts : Les techniques *actives* (SLoPS, TOPP, VPS,...), qui se caractérisent par la précision de leurs résultats, cependant elles sont intrusives à cause du trafic de sondage supplémentaire injecté dans le réseau. Les techniques *passives* (BRuIT, CACP,...) se limitent, quant à elles à observer et à analyser le trafic du réseau. Ces techniques n'altèrent pas le flux de données qui circule dans le réseau, néanmoins, leurs résultats sont imprécis. Une présentation générale des problèmes liés à la mise en œuvre de ces techniques dans des réseaux Ad Hoc réels (synchronisation des nœuds, le modèle de *Traffic Concurrent*,...) est proposée en fin du premier chapitre. Du fait de leur précision, les techniques actives sont choisies pour être étudiées dans le reste de ce document, en particulier les techniques basées sur la dispersion des paquets.

Dans le deuxième chapitre, nous commençons par présenter le principe de fonctionnement des techniques basées sur la dispersion des paquets. Nous avons choisi les techniques SLoPS et TOPP. Ces dernières utilisent le même principe pour estimer la BPD. TOPP et SLoPS tentent de détecter le dépassement du débit de la BPD par celui du trafic de sondage injecté dans le réseau. Cependant, TOPP adapte le débit du trafic de sondage *linéairement* à chaque itération alors que SLoPS utilise une stratégie *binaire*.

Dans le deuxième chapitre nous avons utilisé la simulation sous NS-2 (Network Simulator version 2) avec plusieurs scénarios pour évaluer les estimations de TOPP (capacité et BPD) et SLoPS (BPD), dans un réseau sans fil (avec la norme IEEE 802.11) et un réseau filaire (Ethernet, IEEE 802.3). Cette simulation nous a permis d'explorer les effets des protocoles sans fil (la couche MAC et Physique) sur les estimations de la BPD et la capacité. Les stratégies de sondage *linéaires* et *binaires* ont des conséquences sur les *délais de sondage* et la *précision* des techniques d'estimation. Ces deux paramètres sont étudiés et modélisés dans le troisième chapitre.

Nos deux principales contributions sont détaillées dans le troisième chapitre. Une modélisation mathématique des mécanismes de sondage des deux techniques TOPP et SLoPS nous a permis de proposer une nouvelle technique nommée SLOT (SLOps\_Topp). Cette technique est elle aussi active, en injectant des trains de paquets de sondage dans le réseau, mais elle combine les deux stratégies (*binaire* et *linéaire*) pour adapter le débit de son trafic de sondage, ceci afin de détecter la BPD. En effet, la stratégie binaire permet d'accélérer le processus de sondage mais son résultat sous forme d'intervalle rend SLoPS moins précise. En revanche, la stratégie linéaire ralentit le processus de sondage, mais apporte des résultats plus précis dans le cas de TOPP. SLOT divise sa phase de sondage en deux étapes, la première utilise la stratégie binaire pour minimiser le temps de convergence en estimant un intervalle de variation de la BPD, tandis que la deuxième étape, lance une recherche linéaire dans l'intervalle résultant de la première étape pour avoir des résultats plus précis. L'évaluation de ces deux paramètres dans les trois techniques (SLoPS, TOPP et SLOT) est faite en utilisant des scénarios de simulation sous NS-2. Cette simulation a montré que dans la plupart des cas, la combinaison permet à SLOT d'avoir des *délais de sondage* inférieurs par rapport à TOPP et des estimations plus *précises* par rapport à SLoPS. Ce qui a été prouvé avec le modèle mathématique développé au début du chapitre.

La technique SLOT a hérité de SLoPS la contrainte de synchronisation des nœuds sans fil en calculant les OWDs (One Way Delay). Cela complique l'implémentation de SLOT dans des réseaux sans fil réel. Nous avons pensé à apporter une solution à ce problème en remplaçant la première étape de la phase de sondage de SLOT par une autre technique appelée NIMBE. Cette technique mesure les RTT pour estimer la BPD. De ce fait, NIMBE ne nécessite pas la synchronisation entre les nœuds du réseau. Cette amélioration a conduit à une deuxième contribution qui constitue le développement d'une nouvelle technique nommée TOPP-NET (TOPP-Non invasive Estimation Technique). Le deuxième avantage de



l'utilisation de NIMBE est qu'elle injecte moins de train de paquets de sondage dans le réseau pour estimer la BPD (moins de perturbation). TOPP-NET a été évaluée sur un réseau réel en utilisant un réseau Ad Hoc Wi-Fi (IEEE 802.11b) de quatre ordinateurs. Les résultats de cette expérimentation sont comparés avec ceux de la simulation de SLOT. TOPP-NET a montré de meilleures performances du point de vue *délais de sondage* et *précision*.

Dans le quatrième chapitre nous nous sommes intéressés au filtrage des estimations de la BPD. En effet, les valeurs d'estimation contiennent toujours du bruit quelque soit le type de la technique utilisée. Nous avons présenté les différents filtres adaptatifs (filtre de Stabilité, filtre d'Erreur et filtre Flip-Flop) basés principalement sur les filtres EWMA. Ces derniers sont très utilisés dans le domaine sans fil. Notre troisième et dernière contribution est la réalisation d'un filtre adaptatif appelé *Zone-Filter* (*filtre adaptatif par zone*). Ce dernier utilise des méthodes statistiques (CSP, 3-Sigma et WECO) pour faire la sélection d'un filtre parmi quatre filtres EWMA. Il est à noter que le filtre *Zone-Filter* est plus performant que le filtre Flip-Flop, sachant que ce dernier a été déjà comparé aux filtres de Stabilité et filtre d'Erreur dans [Kim 2001]. Le filtre *Zone-Filter* fournit des estimations plus précises en adoptant un filtrage plus adaptatif et plus fin que celui du filtre Flip-Flop.

Dans le quatrième chapitre nous avons également présenté les différentes mises en œuvre de TOPP-NET. Ainsi, cette technique peut être utilisée en tant que processus indépendant, dans un modèle de QoS, dans une application multimédia ou bien dans un protocole de routage. Nous avons détaillé l'exemple de la différenciation de services dans le protocole de routage CIVIC, en utilisant TOPP-NET combinée à un automate adaptatif.

Les études présentées ici nous ont permis de développer une technique d'estimation simple du point de vue application, car elle prend en compte qu'un saut. Cette technique est encore à développer pour prendre en compte plusieurs sauts dans un réseau Ad Hoc. Cela est réalisable en utilisant plusieurs nœuds avec un protocole de routage multi-saut (e.g. CIVIC ou OLSR). Aussi, nous n'avons pas pris en considération plusieurs paramètres comme la mobilité des nœuds, les conditions extérieures comme les changements climatiques qui affectent les communications dans le cas des réseaux de capteurs sans fil. Tout au long de ces études nous avons utilisé un *Traffic Concurrent* avec un débit constant, ce qui n'est pas vrai dans le cas réel où les fluctuations du *Traffic Concurrent* dans le réseau sont aléatoires. De ce fait, d'une part il reste à tester TOPP-NET dans des conditions différentes avec un plus grand nombre de nœuds et d'autre part, l'améliorer pour qu'elle soit plus robuste. Ces études nous ont permis aussi de mettre en lumière sur les différents problèmes liés à la garantie de la QoS, à l'estimation de la BPD, ainsi qu'au filtrage de ces estimations dans les réseaux Ad Hoc sans fil.

\*\*\*\*\*



## **Bibliographie**

- [Ahn 2002] Ahn, G.H., Campbell, A. T., Veres, A., Sun, L. H. "SWAN: Service Differentiation in Stateless Wireless Ad Hoc Networks", IEEE INFOCOM'2002, New York, June 2002, vol. 2, pp : 457-466.
- [Akyildiz 2005] Ian F. Akyildiz, Xudong Wang, Weilin Wang, "Wireless mesh networks: a survey", journal Elsevier Computer Networks 200, 547, pp : 445-487.
- [Almes 1999] Almes G., Kalidindi S., Zekauskas M., "A One-way Delay Metric for IPPM", Request for Comments: RFC 2680 Internet Engineering Task Force, September 1999.
- [Amamra 2004] A. Amamra, R. Aufrère, J.P. Chanet, G. De Sousa, J.J. Li, H.Y.Zhou and K.M. Hou, "A New Adaptive Zone-Filter to estimate RTT in MANET ", In Proceedings of 5th The International Arab Conference on Information Technology (ACIT' 2004), Constantine, Algeria, December 12-15, 2004, Vol 1, pp 235-240.
- [Andreas 2005a] Andreas Johnsson, "Bandwidth Measurements in Wired and Wireless Networks", Thèse de doctorat en informatique, Department of Computer Science and Electronics Mälardalen University, Västerås, Sweden, April 2005.
- [Andreas 2005b] Andreas Johnsson, Bob Melander, and Mats Björkman. "Bandwidth Measurement in Wireless Network", Technical report, Mälardalen University, Sweden, March 2005.
- [Badis 2003] Badis H., A. Munaretto, K. Al Agha & G. Pujolle. "QoS for ad hoc networking based on multiple metrics: bandwidth and delay". In International Conference on Mobile and Wireless Communications Networks, Sangri, Singapore, 2003, 4 pages.
- [Badis 2004] Badis H., Munaretto A., AL Agha K., Pujolle G., "Optimal path selection on a link state QoS routing", VTC'2004 Spring, Milan Italy may 2004.
- [Barry 2001] Barry, M, Campbell, A.T, Veres, "A Distributed control algorithms for service differentiation in wireless packet networks", IEEE

- INFOCOM'2001, Anchorage, Alaska, April 2001, vol. 1, pp : 582-590.
- [Bellovin 1992] Bellovin S., "A Best-Case Network Performance Model," Technical report, AT&T Bell Laboratories, 12 Feb 1992.
- [Berlemann 2006] Berlemann L., "Distributed Quality-of-Service Support in Cognitive Radio Networks", Thèse de doctorat en informatique, l'université de Department of Electrical Engineering and Information Technology the Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen 9. Février 2006.
- [Bin 2007] Bin Le (CRT), Thomas W. Rondeau (VT), and Charles W. Bostian (VT) "General Radio Interface Between Cognitive Algorithms and Reconfigurable Radio Platforms", SDR Forum Technical Conference, Denver, CO, November 5-9, 2007.
- [Bolot 1993] J. C. Bolot, "Characterizing End-to-End Packet Delay and Loss in the Internet," in Proceedings of ACM SIGCOMM, 1993, pp : 289-298.
- [Carter 1996] R. L. Carter and M. E. Crovella, "Dynamic Server Selection Using Bandwidth Probing in Wide-Area Networks", Technical Report TR-96-007, Boston University Computer Science Department, 1996.
- [Chan 2003] K. Chan, R. Sahita, S. Hahn, K. McCloghrie, "Differentiated Services Quality of Service Policy Information Base", IETF-Network Working Group RFC 3317, March 2003.
- [Chanet 2006] Chanet J. P., K. M. Hou, Amamra A., De Sousa G. & Li J. J., "A Non Invasive Manet Bandwidth Estimator for quality of service: NIMBE", In 5th IEEE International Information and Telecommunication Technologies Symposium (I2TS'2006), pp : 30-34, Cuiaba, Brazil, 2006.
- [Chanet 2007] Chanet J.P. "Algorithme de routage coopératif à qualité de service pour des réseaux ad hoc agri-environnementaux", Thèse de Doctorat en Informatique, Université Blaise Pascal, Clermont Ferrand, France, 20 Avril 2007.
- [Chaudet 2002] Chaudet Claude, Isabelle Guérin Lassous, "BRuIT: Bandwidth Reservation under InTerferences influence", In Proceedings of European Wireless 2002 (EW2002), Florence, Italy, Feb 2002.
- [Chaudet 2004] Chaudet, C, "Autour de la réservation de bande pas sante dans les réseaux ad hoc", Thèse de Doctorat en Informatique, l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France, 28 Septembre 2004.
- [Chen 1997] Chen, T.W., Tsai, J. T., and Gerla, M, "QoS Routing Performance in Multihop Multimedia Wireless Networks", Proceedings of IEEE

- International Conference on Universal Personal Communications (ICUPC), San Diego, CA, October 1997, vol. 2, pp : 557-561.
- [Chen 2002] K. Chen, S. H. Shah, and K. Nahrstedt, "Cross Layer Design for Data Accessibility in Mobile Ad-hoc Networks", *Journal of Wireless Communications*, 2002, vol 21, pp : 49-75.
- [Clausen 2003] Clausen T., Jacquet P., "Optimized Link State Routing Protocol (OLSR)", Request for Comments: RFC 3626 Internet Engineering Task Force, Juillet 2003.
- [Conti 2003] Conti, M. Body, "Personal, and Local Ad hoc wireless networks", in the *Handbook of Ad hoc wireless networks*, I. Mohamed, Ed., CRC Press, Florida, 2003, pp : 3-24.
- [Crawley 1998] Crawley. E, Nair. R, Rajagopalan. B, Sandick. H, "A Framework for QoS-based Routing" in the Internet Network Working Group Request for Comments: RFC 2386, Category: Informational, August 1998.
- [Diao 2008] X. X. Diao, J. J. Li, K.M. Hou, H.Y.Zhou, and A. Jacquot, "Cooperative Inter-vehicule Communication Protocol Dedicated to Intelligent Transport Systems", in *Proceeding of NTMS Conference*, 5 pages, Tanger, MOROCO, 2008
- [Dovrolis 2001] C. Dovrolis, P. Ramanathan, and D. Moore, "What do Packet Dispersion Techniques Measure?", in *Proceedings of IEEE INFOCOM*, AK, USA, Apr 2001, vol 2, pp : 905-914.
- [Ermel 2004] M. ERMEL Erwan, "Localisation et Routage géographique dans les réseaux sans fil hétérogènes" Thèse de Doctorat de l'université Paris VI Pierre et Marie CURIE, Soutenue le 21 Juin 2004.
- [Frank 2004] Frank Y. Li, Mariann Haugea, Andreas Hafslund, Oivind Kure and Pal Spilling, "Estimating Residual Bandwidth in 802.11-based Ad Hoc Networks: An empirical Approach", In *Proceedings of The Seventh International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC 2004)*, Abano Terme, Italy, September 2004.
- [Ge 2003] Ge Y, Kunz T, Lamont L, "Quality of Service Routing in Ad Hoc Networks Using OLSR", *HICSS'2003*, Bing Island, Hawaï, janvier 2001.
- [Gorry 2001] <http://www.erg.abdn.ac.uk/users/gorry/course/>
- [Haas 2002] Haas Z.J., Pearlman M.R and Samar P., "The Zone Routing Protocol (ZRP) for Ad Hoc Networks", Draft Internet IETF 4, Cornell University, NewYork, USA, Juillet 2002, 11 pages.

- [Heinanen 1999] J. Heinanen, F. Baker, W. Weiss, J. Wroclawski, "Assured Forwarding PHB Group", IETF-Network Working Group RFC 2597, June 1999.
- [Hill 2002] Hill J. L. & D. E. Culler. "MICA: a wireless platform for deeply embedded networks". IEEE Micro, 2002, vol 22, no. 6, pp : 12-24.
- [Hofmann 2000] Hofmann U. Pfeiffenberger T. Hechenleitner B., "One-Way-Delay Measurements with CM Toolset", Performance, Computing, and Communications Conference 2000, IPCCC '00. Conference Proceeding of the IEEE International Publication, Feb 2000, pp : 41-47.
- [Hou 05] K. M. Hou, J. P. Chanet, F. Pinet, F. Vigier, J. J. Li, R. Aufrère, H. Zhou, G. De Sousa, A. Amamra, M. Schneider & M. A. Kang. "Vers une Communication Inter Véhicule Intelligente Coopérative : CIVIC". In Colloque Société de l'Information, Bilan du Programme Interdisciplinaire de Recherche du CNRS 2001-2005, 9 pages, Lyon, France, 2005.
- [Hsu 1997] Hsu, Y.C., Tsai, T.C, "Bandwidth Routing in Multihop Packet Radio Environment", Proceedings of the 3rd International Mobile Computing Workshop, Pisa, Mars 1997.
- [Hu 2003] N. Hu, P. Steenkiste. "Evaluation and Characterization of Available Bandwidth Probing Techniques", In the IEEE Journal SAC Special Issue in Internet Measurement, Mapping, and Modeling, vol 21, Issue 6, August 2003, pp : 879-894.
- [Hurbain 2003] Hurbain. I, "Optimisation de la bande passante pour le broadcast vidéo sur réseau IP", Rapport bibliographique. Mémoire de master en informatique, Ecole des Mines, Paris, France, 2003, 25 pages.
- [IEEE 2001] IEEE Draft Std 802.11e, "Medium Access Control (MAC) Enhancements for Quality of Service (QoS)", IEEE standard 802.11, November 2001.
- [Jacobson 1988] Jacobson V., "Congestion Avoidance and Control", in Proceedings of ACM SIGCOMM, Sept 1988, pp : 314-329.
- [Jacobson 1997] Jacobson V., "Pathchar: A Tool to Infer Characteristics of Internet Apr 1997, Paths," <ftp://ftp.ee.lbl.gov/pathchar/>
- [Jacobson 1999] V. Jacobson, K. Nichols, K. Poduri, "An Expedited Forwarding PHB", IETF-Network Working Group RFC 2598, June 1999.
- [Jain 2002a] Jain M. and C. Dovrolis, "End-to-End Available Bandwidth: Measurement Methodology, Dynamics, and Relation with TCP Throughput", in Proceedings of ACM SIGCOMM, Aug. 2002, pp : 295-308.

- [Jain 2002b] Jain, M. and Dovrolis, C. "Pathload: A Measurement Tool for End-to-End Available Bandwidth". In Proceeding of Passive and Active Measurements. Fort Collins, CO, March 2002.
- [Jiang 1999] W., H. Schulzrinne, "QoS Measurement of Internet Real-Time Multimedia Services". Technical Report CUCS015-99, Columbia University, New York, December 1999.
- [Johnson 2004] Johnson D.B., Maltz D.A.A., Hu Y.C., "The Dynamic Source Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks (DSR)", Draft Internet IETF, Juillet 2004.
- [Johnson 2005] A. Johnson, B. Melander, and M. Björkman, "Bandwidth Measurement in Wireless Networks". In Mediterranean Ad Hoc Networking Workshop, Porquerolles, France, June, 2005.
- [Kang 2001] Kang, S. S., Mutka, M. W., "Provisioning Service Differentiation in Ad Hoc Networks by the Modification of Backoff Algorithm", International conference on computer communication and network (ICCCN'01), Scottsdale, Arizona. October 2001.
- [Kara 06] M. Kara, K. M. Hou, J. P. Chanet, H. Zhou, M. A. Kang & F. Pinet. "Low Cost Differential GPS receivers (LCD-GPS): urban vehicle tracking", In 5th IEEE International Information and Telecommunication Technologies Symposium (I2TS'2006), Cuiaba, Brazil, 2006, pp : 16-21.
- [Keshav 1991] S. Keshav, "A Control-Theoretic Approach to Flow Control", in Proceedings of ACM SIGCOMM, Sept 1991, pp : 3-15.
- [Khoukhi 2006] Khoukhi Lyes, "Gestion intelligente de qualité de service dans les réseaux Ad Hoc mobiles sans fil", Thèse de Doctorat en Informatique, Université de Sherbrooke, Canada, 13 Septembre 2006.
- [Kim 2001] M. Kim and B. Noble, "Mobile Network Estimation". In ACM SIGMOBILE, Rome, Italy, 2001, pp : 298-309.
- [Kui 2001] Kui Wu and Janelle Harms, "QoS Support in Mobil Ad Hoc Networks, Crossing Boundaries", in interdisciplinary journal vol 1, no 1 Computing Science Department, University of Alberta, Fall 2001.
- [Labiod 2006] Labiod Houda, "Réseaux mobiles ad hoc et réseaux de capteurs sans fil", Livre, édition Hermès science pub: Lavoisier, 2006. ISBN 2-7462-1292-7.
- [Lai 1999] Lai, Kevin. and Mary Baker, "Measuring bandwidth", In Proceeding 18th INFOCOM 1999, IEEE Computer Society Press Los Alamitos, CA New York (USA), pp. 235-245.

- [Lai 2000] Lai Kevin, Mary Baker "Measuring link bandwidths using a deterministic model of packet delay" in Proceedings of ACM SIGCOMM Computer Communication Review, October 2000, vol 30 , Issue 4 pp : 283-294.
- [Lee 2000] S. B. Lee, G.S. Ahn, X. Zhang, and A. T. Campbell. "INSIGNIA: An IP-Based Quality of Service Framework for Mobile Ad-hoc Networks", Journal of Parallel and Distributed Computing, 2000, vol 60, pp : 374-406.
- [Legout 2000] A. Legout. "Contrôle de congestion multipoint pour les réseaux best effort". Thèse de doctorat en informatique, Université Nice-Sophia Antipolis, Institut Eurecom, Sophia Antipolis, France, 2000, 182 pages.
- [Lin 2000] Lin C. R. and Liu, C.C. "An On-demand QoS Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks", IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM), San Francisco, April 2000, vol 3, pp : 1783-1787.
- [Lucas 1990] Lucas. J.M. and M.S. Saccucci, "Exponentially weighted moving average control schemes: Properties and Enhancements", Technometrics : A Journal of Statistics for the Physical, Chemical and Engineering Sciences, 1990. vol 32: pp : 1-29.
- [McGraw 2003] McGraw Hill/Osborne. "CWNA, Certified Wireless Network Administrator". Livre, Official Study Guide, (Exam PW0-100), Second Edition 2003 by Planet3 Wireless.
- [Melander 2000] B. Melander, M Bjorkman, and P Gunningberg, "A New End-to-End Probing and Analysis Method for Estimating Bandwidth Bottlenecks" , In Proceedings of the Fifth IEEE Global Internet Symposium in held in conjunction with Globecom 2000, San Francisco, USA, November 2000.
- [Melander 2002] B. Melander, M. Bjorkman, and P. Gunningberg, "Regression-Based Available Bandwidth Measurements," in International Symposium on Performance Evaluation of Computer and Telecommunications Systems, 2002.
- [Montgomery 2005] Montgomery, D.C, "Introduction to Statistical Quality Control", 5th Ed., John Wiley & Sons, Hoboken, New York, 2005.
- [Moraru 2006] Moraru L, Simplot-Ryl D, "QoS preserving topology advertising reduction for OLSR routing protocol for mobile ad hoc networks", Rapport de Recherche INRIA, n°0312 September 2005.
- [Nahrstedt 2004] Nahrstedt K., Shaha S., Chen K., "Cross layer Architectures for Bandwidth Management in wireless Networks", dans M Cardei, I. Cardei D.Z.Zhu (dir), Resource Management Networking, Kluwer



- Academic Publishers Boston 2004.
- [Nguyen 2005] Nguyen D.Q., Minet P., Evaluation de la bande passante nécessaire au niveau MAC 802.11b, Actes de CFIP'05, Bordeaux, mars 2005
- [Nist 2004] Nist/Sematech, 6. "Process or Product Monitoring and Control", in e-Handbook of Statistical Methods, NIST, Editor. 2004, <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/>
- [NS-2 2008] The *ns* Manual, "formerly *ns* Notes and Documentation", The VINT Project, A collaboratoin between researchers at, UC Berkeley, LBL, USC/ISI, and Xerox PARC, Kevin Fall, Editor, Kannan Varadhan, Editor 2008.
- [Ogier 2004] Ogier R., Templin F., Lewis M., "Topology Dissemination Based on Reverse Path Forwarding (TBRPF)", IETF RFC 3684, Février 2004.
- [Opnet 2008] <http://www.Opnet.com>.
- [Pasztor 2002] A. Pasztor and D. Veitch, "The Packet Size Dependence of Packet Pair Like Methods," in IEEE/IFIP International Workshop on Quality of Service (IWQoS), 2002.
- [Paxson 1997] V. Paxson, "Measurements and Analysis of End-to-End Internet Dynamics", Ph.D. thesis, University of California, Berkeley, 1997.
- [Paxson 1998] V. Paxson, G. Almes, J. Mahdavi, and M. Mathis, "Framework for IP performance metrics," RFC 2330, Internet Engineering Task Force, May 1998.
- [Perkins 2003a] Perkins C., Belding-Royer E.M., Das S., "Ad Hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing", Internet Request For Comments RFC 3561, Internet Engineering Task Force, Juillet 2003.
- [Perkins 2003b] Perkins C., Belding-Royer E.M., Das S., "Quality of service for Ad Hoc On-Demand Distance", travail en cours draft-perkins-manet-aodvqos02.txt, October 2003.
- [Prasad 2003] Prasad R. S., M. Murray, C. Dovrolis, and K. Claffy, "Bandwidth estimation: Metrics, measurement techniques, and tools," IEEE Network, Nov. 2003, vol. 17, no. 6, pp : 27–35.
- [Pujolle 2003] G. Pujolle. "Les réseaux sans fil et l'Internet ambiant". In DNAC Paris, France, 2003, 17 pages.
- [Renesse 2004] R de Renesse, Mona Ghassemian, Vasilis Friderikos, A. Hamid Aghvami. "QoS Enabled Routing in Mobile Ad Hoc Networks", In IEE 3G 2004.
- [Renesse 2005] R. de Renesse, M. Ghassemian, V. Friderikos, A.H Aghvami. "Adaptive Admission Control for Ad Hoc and Sensor Networks Providing Quality of Service", Technical report, King

- College London, May 2005.
- [Satyabrata 2003] Satyabrata Chakrabarti, Amitabh Mishra. "Quality of Service in Mobile Ad Hoc Networks", in the Handbook of Ad hoc wireless networks, I. Mohamed, Ed., CRC Press, Florida, Chapter 3. 2003.
- [Shenker 1997] S. Shenker, Partridge, R. Guerin, "Specification of Guaranteed Quality of Service", IETF-Network Working Group RFC 2212, September 1997.
- [Sheu 2001] Sheu Shiann-Tsong; Sheu Tzu-Fang "A bandwidth allocation/sharing/ extension protocol for multimedia over IEEE 802.11 ad hoc wireless LANs", Selected Areas in Communications, IEEE Journal, October 2001, on vol 19, Issue 10, pp : 2065-2080.
- [Silvia 2002] Silvia Giordano, "Mobile Ad Hoc Networks, in the handbook of Wireless Networks and Mobile Computing", E. Ivan Stojmenovic, John Wiley & Sons, Inc., New York, 2002, pp : 325-346.
- [Sivakumar 1999] Sivakumar R., Sinha P. & Bharghavan V., "CEDAR: a Core Extraction Distributed Ad hoc Routing algorithm". IEEE Journal on Selected Areas in Communication, Août 1999, vol. 17, Issue no. 8, pp : 1454-1465.
- [Strauss 2003] J. Strauss, D. Katabi, F. Kaashoek. "A Measurement Study of Available Bandwidth Estimation Tools", In The proceedings of Internet Measurements Conference (IMC'2003), Floride, 2003.
- [Van 2003] P. Van Mieghem, F.A. Kuipers, T. Korkmaz, M. Krunz, M. Curado, E. Monteiro, X. Masip-Bruin, J. Solé-Pareta, and S. Sánchez-López, "Quality of Service Routing", Chapter 3 in Quality of Future Internet Services, EU-COST 263 Final Report, 2003 edited by Smirnov et al. in Springer LNCS 2856, pp : 80-117.
- [Vicisano 1998] L. Vicisano, L. Rizzo & J. Crowcroft. "TCP-like congestion control for layered multicast data transfer", In Infocom'98, San Francisco, USA, 1998, pp : 996-1003
- [Villa 2006] Villa, D. L., Castellanos, C. U. "A study of Available Bandwidth Estimation Techniques to be applied in Packet-Switched Mobile Networks" Ph.D. Thesis, Institute Of Electronic Systems Department of Communication Technology, May 10th 2006.
- [Vladimir 2003] Vladimir Smotlacha, "One-Way Delay Measurement Using NTP Synchronization", TNC 2003.
- [Wroclawski 1997a] J. Wroclawski "The Use of RSVP with IETF Integrated Services" MIT LCS, IETF - Network Working Group RFC 2210, September 1997.

- [Wroclawski 1997b] J. Wroclawski MIT LCS “Specification of the Controlled-Load Network Element Service”, IETF - Network Working Group RFC 2211, September 1997.
- [Xiao 2000] Xiao Hannan, Winston K.G. Seah, Anthony Lo, et Kee Chaing Chua, “A Flexible Quality of Service Model for Mobile Ad Hoc Networks”, in Proceedings of the fifty-first IEEE Vehicular Technology Conference (VTC 2000-Spring), Tokyo, Japon, May 2000, pp : 445-449.
- [Yang 2005] Yang Yaling and Robin Kravets. “Contention Aware Admission Control for Ad Hoc Networks”, IEEE Transactions on Mobile Computing, 2005, vol 4, pp :363-377.
- [Yongmin 2000] Choi, Heung-No Lee, and Anurag Garg. “Measurement and analysis of wide area network (wan) traffic”, In SCS Symposium on Performance Evaluation of Computer and Telecommunication Systems, July 2000.

\*\*\*\*\*



## Résumé

L'IEEE 802.11 (Wi-Fi) est le standard de WLAN (Wireless Local Area Network). En conséquence, le marché des produits dotés de la technologie réseau Wi-Fi est en plein essor et a provoqué une véritable révolution dans le monde de l'informatique. Cependant, la communication utilisant le Wi-Fi ne présente pas, pour autant, que des avantages. La grande différence entre le débit théorique et le débit effectif dépend de nombreux paramètres. Il est, par exemple, difficile de faire du streaming vidéo haute définition en utilisant un réseau IEEE 802.11g, alors que son débit théorique le permet parfaitement. La technologie WLAN souffre d'autres contraintes, comme la nature vulnérable du médium sans fil (interférences électromagnétiques, multi-trajet,...), l'accès indéterministe au médium, la limitation de la bande passante etc.

Les applications utilisant les réseaux Ad Hoc deviennent de plus en plus complexes et offrent de nouveaux services qui exigent des performances réseau de plus en plus élevées. De ce fait, la Qualité de Service (QoS) dans les réseaux Ad Hoc est un sujet de recherche ouvert. La bande passante est un indicateur très important pour la garantie de la QoS.

Dans notre travail de thèse, nous avons étudié l'un des aspects de la QoS qui est la Bande Passante Disponible (BPD) dans les réseaux Ad Hoc basés sur la norme IEEE 802.11. Particulièrement, nous nous sommes intéressés aux différentes techniques d'estimation de la BPD et avons évalué les performances de ces techniques du point de vue temps de réponse et précision des estimations. Ces techniques peuvent être utilisées dans d'autres types de réseaux sans fil ou filaire.

Nos contributions sont, essentiellement, le développement de deux nouvelles techniques d'estimation de la bande passante SLOT (SLOps-Topp) et TOPP-NET (TOPP-Non invasive Estimation Technique). Ces deux techniques sont le résultat d'améliorations successives des techniques d'estimation qui existent dans la littérature (TOPP : *Trains of Packet Pairs*, SLOPS : *Self-Loading Periodic Streams* et NIMBE : *Non Invasive Manet Bandwidth Estimation*) en mettons l'accent sur la *précision* et le *délai de sondage* des techniques d'estimation. Notre troisième contribution est une nouvelle méthode de filtrage adaptatif des estimations nommée ZONE-FILTER (*Filtrage par Zone*). Cette méthode combine les filtres EWMA et la méthode statistique SPC (Statistical Process Control).

## Abstract

IEEE 802.11b (Wi-Fi) is the protocol standard of WLAN (Wireless Local Area Network). As the market of the network products equipped with Wi-Fi is booming, a true revolution in the computer world happening. However, the communication adopting Wi-Fi technology also brings some challenges. For example, the theoretical throughput of the Wi-Fi communication has an obvious difference with the real one, e.g. it is difficult to make high-definition video streaming using an IEEE 802.11g network, but it's acceptable in the theoretical throughput estimation. Moreover, some inherent constraints of the wireless communication, such as the vulnerability of wireless medium (electromagnetic interference, multi-path...), the indeterminism access to the medium and limitation of the bandwidth etc, are also presented in the Wi-Fi network.

Applications in ad hoc networks become more complex and are able to offer more new services, which thus require improving the network performances of WLAN. The Quality of Service (QoS) in ad hoc networks is still an open research topic, in which the network bandwidth is a significant indicator for the QoS guarantee.

In this thesis we focus on one research issue of QoS: the available bandwidth (BPD) estimation in Ad Hoc networks based on IEEE 802.11. We compare different BPD estimation techniques and analyze the performances of these techniques in terms of response time and accuracy estimation. These techniques can be used in other types of wireless or Ethernet networks

Our contributions are: having developed two new techniques for estimating the bandwidth SLOT (SLOps-Topp) and TOPP-NET (TOPP Non-invasive Estimation Technique), which are based upon the two existed estimation techniques in the literature (TOPP: *Trains of Packet Pairs*, SLOPS: *Self-Loading Periodic Streams* and NIMBE: *Non Invasive Manet Bandwidth Estimation*) by improving the estimation accuracy and decreasing the probing delay; Having proposed a new estimations adaptive filter method called ZONE-FILTER (filtering by zone), ). Which combine the EWMA filters and the statistical method SPC (Statistical Process control).